



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



**KUM-ÇAKIL KARIŞIMLARININ MONOTONİK
YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA
GERİLME-DEFORMASYON DAVRANIŞI**

Yüksek Lisans Tezi

Gül Ece HIZAL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**KUM-ÇAKIL KARIŞIMLARININ MONOTONİK
YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA
GERİLME-DEFORMASYON DAVRANIŞI**

Gül Ece HIZAL

Danışman: Prof. Dr. Alper SEZER

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2023

Gül Ece Hızal tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Kum-Çakıl Karışımlarının Monotonik Yükleme Altında Davranışı” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesinin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 04.05.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:**İmza**

Jüri Başkanı : **Prof. Dr. Alper SEZER**

Raportör Üye : **Dr. Ö.Ü. Devrim Ş. ERDOĞAN**

Üye : **Prof. Dr. Cem KINCAL**



EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI**

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Kum-Çakıl Karışımlarının Monotonik Yükleme Koşulları Altında Gerilme-Deformasyon Davranışı” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

29 / 05 / 2023

Gül Ece HIZAL



ÖZET**KUM-ÇAKIL KARIŞIMLARININ MONOTONİK
YÜKLEME KOŞULLARI ALTINDA GERİLME-DEFORMASYON****DAVRANIŞI**

HIZAL, Gül Ece

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Alper SEZER

Mayıs 2023, 67 sayfa

Sıvılaşma olayı, geoteknik mühendisliğinde sıklıkla karşılaşılan bir problem olarak, kısaca zeminin tekrarlı ve/veya monotonik yükler altında katı halden sıvı hale geçmesi olarak tanımlanabilmektedir. Kohezyonsuz zeminlerde drenajsız koşullarda ani yüklemeler beklenebilir. Bu durum literatürde “sıvılaşma” olarak isimlendirilen, boşluk suyu basıncında önemli derecede bir artışa ve efektif gerilmenin azalmasına neden olmaktadır. Literatürde, monotonik yükler altında, farklı gradasyonlarda ince çakıl ve kaba kumların sıvılaşma potansiyelini inceleyen çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Bu bakımdan, bu çalışma farklı gradasyonlara sahip temiz kum/çakıl karışımlarının monotonik yükleme altındaki sıvılaşma potansiyelinin araştırılmasına yönelik bir deneysel çalışmanın sonuçlarını içermektedir. Bu amaçla kabadan inceye doğru derecelendirilen kum örneklerine ağırlıkça %25, %50 ve %75 oranlarında çakıl ilave edilmiştir. Bu zemin örnekleri %50 rölatif sıklıkta hazırlanmış ve her biri 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında statik üç eksenli basınç deneylerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlar; çevre basıncının ve gradasyonun sıvılaşma potansiyeli üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çevre basıncı arttıkça zemin örneklerinin dayanımı artmaktadır, bununla beraber iri daneli zeminlerde artan çevre basınçlarında sıvılaşma gözlemlenmiş, kum çakıl karışımlarında ise genellikle %25 ince çakıl içeriğinde sıvılaşma gözlemlenmiştir. Son olarak, kırılma anındaki deviator gerilme ve deformasyon seviyelerinin tahmini için bir model önerilmiştir.

Anahtar sözcükler: Üç eksenli basınç deneyi, sıvılaşma, dane boyu dağılımı.



ABSTRACT**STRESS-STRAIN BEHAVIOR OF SAND-GRAVEL MIXTURES****UNDER MONOTONIC LOADING CONDITIONS**

HIZAL, Gül Ece

M.Sc. in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Alper SEZER

May 2023, 67 pages

Liquefaction phenomenon, which can be briefly defined as the transition of the soil state from solid to liquid under cyclic and/or monotonic loading, is a frequently encountered problem in geotechnical engineering. In a cohesionless soil, a considerably high rate of loading can be expected under undrained conditions. This may cause a significant increase in the pore water pressure, and a decrease in effective stress, which is simply identified as “liquefaction” in the literature.

A comprehensive study that investigates the liquefaction potential of clean sand/gravel mixtures with different grain size distributions under monotonic loading is not encountered in the literature. In this context, this study aims to analyze liquefaction behavior of clean sand/gravel mixtures of varying grain size distributions under monotonic loading. For this purpose, fine gravel was mixed with sand, graded from coarse to fine, and the final gravel content of mixtures were of 25, 50 and 75%. The resulting samples were prepared at 50% relative density and static triaxial compression tests were performed at 50, 100, 200 kPa confining pressures. Experimental results show that confining stress and grain size distribution have a remarkable effect on the liquefaction potential. As the cell pressure increases, the strength of the soil samples increases as well. However, liquefaction is observed in coarse grained soils at increasing confining pressures. Besides, in sand-gravel mixtures, liquefaction is even experienced at 25% fine gravel content, due to experimental conditions. Lastly, a model was proposed for estimation of deviatoric stress and deformation levels at failure.

Keywords: Triaxial compressive test, liquefaction, grain size distribution.

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, monotonik yükler altındaki kum/çakıl karışımlarının davranışları, dane boyu tanımlayıcıları esas alınarak incelenmiştir. Ön hazırlık aşamasında 70x140 mm numune boyutunun kullanıldığı üç eksenli basınç deney düzeneğinin bakımı ve kalibrasyonu yapılmıştır. Eş zamanlı olarak belirlenen dane boyutunda kum ve çakıl örnekleri hazırlanarak endeks özellikleri belirlenmiştir. Bununla beraber kaba/ince dane aralığını tarayan malzemeler hem üniform hem de ince çakılla karışım hazırlanarak 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncında ve 1 mm/dk yükleme hızıyla CU deneyi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuş ve gradasyon parametreleri ile sınılaşma ilişkisini göstermek için kümeleme analizi, gradasyon parametreleri ve gerilme oranı ilişkisini göstermek için ise yapay sinir ağı modelleri kullanılmıştır.

İZMİR

29/05/2023

Gül Ece HIZAL



İÇİNDEKİLER

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiv
ŞEKİLLER DİZİNİ	xv
TABLolar DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER	2
3. SIVILAŞMA	7
3.1. Akma Sıvılaşması	7
3.2. Devirsel Hareketlilik	9
3.2.1. Yanal yayılma.....	9
3.2.2. Zemin dalgalanması	11
3.3. Yenilme Kriteri	11
3.4. Sıvılaşmayı Başlatan Parametreler	12
3.4.1. Boşluk suyu basıncı oranı.....	12
3.4.2. Dayanım faktörü.....	12
3.4.3. Şekil değiştirme/deformasyon faktörü	13
4. KÜMELEME ANALİZİ	14
4.1. Hiyerarşik yöntemler	15
4.1.1. Yığılımsal (Agglomerative veya AGNES) algoritmalar.....	15
4.1.2. Bölücü (Divisive veya DIANA) algoritmalar	16
4.2. Hiyerarşik yöntemler	16
4.2.1. K-ortalamlar algoritması.....	16
4.2.2. Bulanık C-ortalamlar algoritması	18
4.2.3. Yoğunluk tabanlı algoritmalar.....	19

İÇİNDEKİLER (Devam)

4.2.4. Grid tabanlı algoritmalar.....	19
5. YAPAY SİNİR AĞLARI	21
5.1. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı ve Temel Elemanları	21
5.2. Yapay Sinir Ağı Modelleri.....	21
5.3. Yapay Sinir Ağlarının Geoteknik Problemlerde Kullanımı	22
6. GEREÇ VE YÖNTEM.....	24
6.1. Zeminlerin endeks özellikleri.....	24
6.1.1. Belli gradasyonda malzemelerin hazırlanması	25
6.1.1. Maksimum/Minimum boşluk oranlarının belirlenmesi	30
6.2. Üç Eksenli Basınç Deneyi.....	33
6.2.1. Deney Düzenegi.....	35
6.2.2. Deney yöntemi.....	36
6.2.3. Örnek hazırlama yöntemi	36
6.2.4. Deneyin yapılışı	38
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	40
7.1. Gradasyon Özelliklerinin ve Çevre Basıncının Dayanıma Etkisi	41
7.2. Sıvılaşmanın Gözlemlenmesi	47
7.3. Membran Penetrasyon Etkisi.....	52
7.4. Kümeleme Analizi Sonuçları	53
7.5. Yapay Sinir Ağları ile sonuçların modellenmesi	56
8. GENEL SONUÇLAR.....	59
KAYNAKLAR DİZİNİ	61
TEŞEKKÜR.....	67
ÖZGEÇMİŞ.....	69

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3. 1 Montana Fort Peck Barajı akma yenilmesi (https://damfailures.org/case-study/fort-peck-dam-montana-1938/ , 5.9.2022 tarihinde erişildi.)	8
Şekil 3. 2 Akma sıvılaşmasına karşı duyarlılık zonu (Steven L. Kramer, 2003)	8
Şekil 3. 3 Devirsel hareketliliğe duyarlılık zonu (Erdoğan, 2011)	9
Şekil 3. 4 Tumwater'da Sunset gölü karavan parkının batı kısmında meydana gelen yanal yayılma (www.earthquake.usgs.gov , 5.9.2022 tarihinde erişildi.).....	10
Şekil 3. 5 Moss Landig Deniz Bilimleri Laboratuvarında meydana gelen yanal yayılma (www.sanctuariesimon.org , 5.9.2022 tarihinde erişildi.)	10
Şekil 4. 1 Farklı şekil ve yoğunluktaki kümeler (Abonyi and Feil, 2007)	14
Şekil 4. 2 Kümeleme algoritmalarının sınıflandırılması (Taşkın ve Gökay 2010)	15
Şekil 4. 3 Kümeler ve küme merkezleri (Larose, 2005).....	17
Şekil 4. 4 Yoğunluk tabanlı kümeleme örneği	19
Şekil 4. 5 Grid tabanlı kümeleme örneği	20
Şekil 5. 1 Yapay sinir ağı mimari yapısı (Önalp ve Arel, 2011)	22
Şekil 6. 1 Deney düzeniğinin genel görünümü	24
Şekil 6. 2 Üniform zeminlerin gradasyon eğrileri	25
Şekil 6. 3 Kum-çakıl karışımlarının gradasyon eğrileri.....	26
Şekil 6. 4 Üniform zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi	28
Şekil 6. 5 %75 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi.....	28
Şekil 6. 6 %50 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi.....	29
Şekil 6. 7 %25 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi.....	29
Şekil 6. 8 a) CS75FG25 örneği b) Maksimum boşluk oranı deneyi.....	30
Şekil 6. 9 Malzemelerin boşluk oranı	32
Şekil 6. 10 Üç eksenli deneyde silindir numune üzerindeki gerilme durumları (Lade, 2016).....	33
Şekil 6. 11 Üç eksenli basınç deney ekipmanları	36
Şekil 6. 12 Örnek hazırlama yöntemleri	37
Şekil 6. 13 Kesme aşaması	39
Şekil 7. 1 FG100 örneği gerilme-deformasyon grafiği.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (Devam)

Şekil 7. 2 MCS100 örneği gerilme-deformasyon grafiği.....	42
Şekil 7. 3 MCS75FG25 örneği gerilme-deformasyon grafiği.....	43
Şekil 7. 4 MCS50FG50 örneği gerilme-deformasyon grafiği.....	43
Şekil 7. 5 MFS 100 örneği gerilme-deformasyon grafiği	44
Şekil 7. 6 MCS25FG75 örneği gerilme-deformasyon grafiği.....	44
Şekil 7. 7 MFS75FG25 örneği gerilme-deformasyon grafiği	45
Şekil 7. 8 MFS50FG50 örneği gerilme-deformasyon grafiği	45
Şekil 7. 9 MFS25FG75 örneği gerilme-deformasyon grafiği	46
Şekil 7. 10 SW100 örneği gerilme-deformasyon grafiği	46
Şekil 7. 11 CS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı.....	47
Şekil 7. 12 CS75FG25 örneği boşluk suyu basıncı oranı	48
Şekil 7. 13 MCS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı	49
Şekil 7. 14 MCS25FG75 örneği boşluk suyu basıncı oranı	49
Şekil 7. 15 MS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı.....	50
Şekil 7. 16 FS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı	50
Şekil 7. 17 FS75FG25 örneği boşluk suyu basıncı oranı	51
Şekil 7. 18 D10-D50 kümeleme analiz sonucu	53
Şekil 7. 19 D10-Cu kümeleme analiz sonucu	53
Şekil 7. 20 D10-Cc kümeleme analiz sonucu	54
Şekil 7. 21 D50-Cu kümeleme analiz sonucu	54
Şekil 7. 22 D50-Cc kümeleme analiz sonucu	54
Şekil 7. 23 Cu-Cc kümeleme analiz sonucu	55
Şekil 7. 24 Korelasyon İlişkisi	55
Şekil 7. 25 Sinir ağı modeli.....	56
Şekil 7. 26 Deneme durum grafikleri.....	57
Şekil 7. 27 Hata histogramı.....	57
Şekil 7. 28 Regresyon grafiği.....	58

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 6. 1 İyi derecelenmiş kum ve ince çakılın gradasyon parametreleri	26
Çizelge 6. 2 Üniform kumların gradasyon parametreleri	27
Çizelge 6. 3 Çakıllı karışımların gradasyon parametreleri	27





SİMGELER VE KISALTMALAR

Simge	Açıklama
σ'_{3c}	En küçük efektif asal gerilme
σ_d	Deviatör gerilme
τ	Kayma gerilmesi
u	Boşluk suyu basıncı
ru	Boşluk suyu basıncı oranı
C_u	Üniformluk katsayısı
C_c	Eğrilik katsayısı
D_{10}	Ağırlıkça %10 geçen danelerin çapı
D_{30}	Ağırlıkça %30 geçen danelerin çapı
D_{50}	Ağırlıkça %50 geçen danelerin çapı
D_{60}	Ağırlıkça %60 geçen danelerin çapı
ϵ_a	Eksenel deformasyon
Kısaltma	Açıklama
FLS	Akma sıvılaşması yüzeyi
SSE	Karesel hata kriteri
FCM	Bulanık c-means
USCS	Birleşik zemin sınıflandırma sistemi
UU	Konsolidasyonsuz- Drenajsız
CU	Konsolidasyonlu- Drenajsız
CD	Konsolidasyonlu- Drenajlı



1.GİRİŞ

Sıvılaşma; 1978 yılında ASCE Geoteknik Mühendisliği bölümü, Zemin Dinamiği Komitesi tarafından “herhangi bir maddenin sıvıya dönüştürülmesi eylemi veya süreci” olarak çok genel bir şekilde tanımlanmıştır. (Wu et al., 2004). Ancak tüm sıvılaşma olaylarının belirgin özelliği drenajsız yükleme koşullarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır. Suya doymun kohezyonsuz zeminlerin drenajsız koşullarda yüklemesi çabuk gelişir ve zemindeki sıkışma eğilimi boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmenin azalmasına neden olmaktadır. (Kramer, 2003).

Sıvılaşma olayı uzun yıllar sadece kum zeminlerde gerçekleşen bir olay olmasına rağmen son yıllarda, doymuş çakıllı zeminlerin de belli koşullar altında kumlar kadar kolay sıvılaşabileceğini kabul etmiştir (Yegian et al., 1994). Bu zamana kadar gerçekleşen; 1948 Fukui, 1964 Alaska, 1983 Borah Peak, 1988 Ermenistan, 1993 Hokkado Nonsei-Oki, 1995 Hyogoken Nambu depremleri ile zemindeki çakıl varlığının da sıvılaşma oluşturabileceği gözlemlenmiştir. Ancak, çakıllı zeminlerde gerçekleşen sıvılaşma vakalarının en iyi belgelenmiş ilk vakası 1983 Borah Peak, İdaho depremidir (Yegian et al., 1994).

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde sıvılaşma duyarlılığı; tane şekli, tane boyutu, minerolojisi, gradasyonu, doymunluk derecesi, rölatif sıkılık gibi birçok parametreye bağlıdır. Zemindeki çakıl varlığı laboratuvar ortamında yapılacak olan deneyleri partikül boyutlarından ötürü olumsuz etkilemektedir. Bunun yanı sıra bu partiküller üç eksenli basınç testinde bir membran sorunu yaratmaktadır, dolayısıyla deney sonuçlarının yorumlanmasında bu etkinin de değerlendirilmesi çok önemlidir.

Bu çalışma kapsamında üç eksenli basınç testi kullanılarak, ince çakıldan başlayarak ince kuma kadar taranan örnekler hem belli oranlardaki çakılla hem de üniform olarak hazırlanarak çakıl varlığının ve miktarının sıvılaşma duyarlılığını ne derece etkilediği araştırılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Sıvılaşma, sabit hacimde monotonik, çevrimsel veya dinamik yüklemeye maruz kaldığında zemin kütlelerinin kayma direncinin azaldığı bir olaydır (Poulos et al., 1985). Deprem sırasında suya doymuş kohezyonsuz zeminlerin sıvılaşmasının temel sebebi, zemin hareketlerinden kaynaklanan kesme gerilmelerinin aşırı hidrostatik basınç uygulamasıdır. Diğer bir deyişle, suya doymuş kohezyonsuz zeminlerde drenajsız şartlardaki yüklemeler çabuk gelişir dolayısıyla zemindeki sıkışma eğilimi boşluk suyu basıncının artmasına ve efektif gerilmenin de azalmasına neden olmaktadır (Kramer, 2003).

Yıllar boyu çeşitli araştırmacılar tarafından sıvılaşma potansiyelini etkileyen da gradasyon, rölatif sıklık, çevre basıncı, doymuşluk derecesi gibi farklı parametreler üzerinde hem arazi de hem de laboratuvar ortamında çeşitli çalışmalar yapılmıştır. (Yoshimi et al., 1989) drenajsız çevrimsel kayma dayanımını (sıvılaşma direnci) üzerinde doymuşluk derecesinin etkini incelemek amacıyla doymuşluk dereceleri %70 ve %100 arasında değişen, %60 rölatif sıklıktaki Toyoura kumu üzerinde çevrimsel kesme testleri yapılmıştır. Bu testler sonucunda; doymuşluk derecesi %70 olan örnekte sıvılaşma direnci fazlayken doymuşluk derecesinin artmasıyla birlikte sıvılaşma direncinde yaklaşık 3 katı kadar bir azalma görülmüştür. Bu sonuçlar ışığında sıvılaşma direncinin artmasındaki etkili yollardan biri de gevşek zeminlerdeki doymuşluk derecesinin azaltılmasıdır.

(Vaid et al., 1990) tarafından değişik gradasyonlarda üç farklı orta kum kullanılarak zeminin sıvılaşma direncine bakılmaktadır. Kullanılan malzeme, British Columbia Earls Greek'ten alınan nehir kumudur ve çalışmalarda üniformluk katsayısı olan C_u 'nun tek başına etkisini izole etmek için malzemeler aynı ortalama dane boyutuna (D_{50}), doğrusal gradasyon eğrisine ve aynı minerolojiye sahiptir. Çalışmada, 200 kPa çevre basıncı altında konsolide edilen zemin örnekleri çevrimsel üç eksenli basınç deneyine tabii tutulmuştur. Buradaki yükleme frekansı 0.1 Hz ve kumun tüm gradasyonlarının davranışı, %22-73 arasında değişen rölatif sıklık üzerinden incelenmiştir. Sonuç olarak; düşük rölatif sıklıktaki örneklerde kötü derecelenmiş kumun çevrimsel dayanımı iyi derecelenmiş kuma oranla daha düşüktür. Ancak rölatif sıklık değeri arttıkça bu durumun tersi gözlemlenmektedir. Kötü derecelenmiş kumlarda rölatif sıklığı yaklaşık %43'e ulaşıncaya kadar gerçekleşen çevrimsel yüklemelerde büzülme deformasyonu, iyi derecelenmiş kumlarda ise sadece çevrimsel hareketliliğe

bağlı şekil değişimi gerçekleşmektedir. Dolayısıyla zemin gradasyonu, gevşek zeminlerde akma yenilmesini de kontrol eden bir parametre olmaktadır.

Xia (1992) çalışmasında, doygunluk derecesinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisini incelemek amacıyla doygunluk derecesi %100, %99.5, %99.1, %97.8 olarak belirlenen kumlar üzerinde çevrimsel üç eksenli testler yapmıştır. Yapılan testler sonucunda doygunluk derecesinin(S_r) ve kısmen kumun doygunluk durumunu yansıtan Skempton boşluk basıncı katsayısının(B) artması sıvılaşma direncini azaltmaktadır.

(Yegian et al., 1994) çalışması yüksek oranda çakıl içeriğine sahip kumlarda da sıvılaşmanın meydana gelebileceğini, aynı zamanda sıvılaşmaya bağlı olarak dolgu yenilmelerinin (embankment failure) de tetiklenebileceğini 1988 yılında 6.8 büyüklüğünde gerçekleşen Ermenistan depremi sonrasında yapılan saha çalışmalarıyla ortaya koymaktadır. Bu kapsamda üç farklı alanda SPT ve CPT deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak; Saha 1 de göçme yaşanan dolgu otoyolda çakıllı kumların sıvılaşması gözlemlenirken aynı zemine sahip Saha 2 de ise herhangi bir sıvılaşma durumu gözlemlenmemiştir. Saha 3'te ise çakıllı silt zemin üzerine inşa edilen demiryolu dolgusunda "akma kayması" şeklinde göçme meydana gelmiştir. Bu gözlemlerin yanısıra yapılan analizlerde de; zemin üst tabakası nispeten geçirimsiz bir tabaka ile kapatılmadığında, bu zeminler sıvılaşma gerçekleşmeden çok yüksek (0.5 g-1.0 g) ivmelere dayanabilmektedir. Bunun yanı sıra 30 cm'e kadar geçirimsiz bir tabaka drenajı engelleyebilir ve aşırı boşluk suyu basıncının dağılmasını engelleyerek çakıllı kumların sıvılaşmasına neden olabilmektedir.

Farklı kum çakıl gradasyonlarında ve farklı rölatif sıklıkta laboratuvarında hazırlanan granüler zemin örnekleri üzerinde Kokusho et al.,(2004) bir dizi drenajsız deneyler yapmıştır. Bu deney sonuçları incelendiğinde, büyük ölçüde sıvılaşma sonrası zemin deformasyonuna sahip yıkıcı yenilmelerin, hemen hemen eşit derecede sıvılaşabilmelerine rağmen, aynı rölatif sıklığa sahip kötü dereceli kumlara kıyasla, iyi derecelenmiş taneli zeminlerde gelişme olasılığının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. İyi derecelenmiş malzemelerin çakıllı parçacıkları, örneğin ayrılmış granit zeminler gibi ezilebilirse, drenajsız monotonik dayanımları oldukça küçüktür ve kötü dereceli kumlarınkiyle hemen hemen aynı veya bundan da daha küçük olmaktadır.

(Della et al., 2011) Bu çalışmada Cezayir Chlef nehri kumu üzerinde çevre basıncı ve örnek hazırlama metodunun kesme davranışını incelemiştir. %0,5 plastik olmayan silt içeren Chlef kumu kuru yağmurlama (dry funnel pluviation) ve nemli biriktirme (wet deposition) olmak üzere iki farklı örnek hazırlama yöntemi kullanarak %50 rölatif sıklıkta hazırlanmıştır. Hazırlanan bu örnekler 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basınçlarıyla izotropik konsolide edilerek üç eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre kuru yağmurlamada da nemli biriktirme yönteminde de çevre basıncının artmasıyla sıvılaşma direnci de artmıştır. Ancak statik sıvılaşma nemli biriktirme yöntemiyle hazırlanan örneklerde ve en düşük çevre basıncında gözlemlenmiştir. Aynı yıl (Della, Arab, & Belkhatir, Static Liquefaction of Sandy Soil: An Experimental Investigation Into The Effects of Saturation And Initial State, 2011) tarafından zeminin başlangıç durumunu ve doymunluk derecesinin sıvılaşma direnci üzerindeki etkisinin incelendiği bir başka çalışma daha yapılmıştır. Bu çalışmada orta sıkı hazırlanan Chlef kumu üzerine drenajlı ve drenajsız monotonik üç eksenli basınç testleri uygulanmıştır. Kuru yağmurlama (dry funnel pluviation) ve nemli biriktirme (wet deposition) yöntemleri kullanılarak hazırlanan örnekler, sabit 100 kPa çevre basıncı ile Skempton boşluk basıncı katsayısı olan B değeri %13 ile %90 arasında değiştirilerek doymunluk etkisi gözlemlenmiştir. Bu doymunluk etkisi incelendiğinde, Skempton boşluk basıncı (B) değerindeki artış, zeminin başlangıç rijitliğinde ve direncinde (maksimum deviator gerilme) bir azalmaya neden olduğunu ve büzülme fazını arttırdığını göstermektedir. Buna ek olarak, Kuru yağmurlama (dry funnel pluviation) metodu, maksimum deviator gerimede önemli bir değere ulaşmakta olup bu durum sıvılaşma direncinin de artması anlamına gelmektedir. Ancak nemli biriktirme metodunda ise tersi bir durum gözlemlenmekte, maksimum deviator gerilme değeri diğer yönteme nazaran çok düşük çıkmaktadır.

(Choobbasti et al., 2014) çalışmada inceden kabaya derecelenmiş olan doymuş kum ve çakıllı kumun sıvılaşma potansiyeli belirlemek amacıyla çevrimsel üç eksenli laboratuvar deneyleri yapmıştır. %45 rölatif sıklıkta ve 100 kPa efektif konsolidasyon basıncı altında deneye tabi tutulan örneklerde gradasyon parametrelerinin (C_u , C_c , D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60}) etkisi incelenmiştir. Hazar kıyı kumu, çakıl ve kaba kum olmak üzere üç farklı zemin türünde sıvılaşma potansiyelinin gradasyon üzerindeki etkisini belirlemek için çakıl ve kaba kum, Hazar kıyı kumu ile ağırlıkça %0, 10, 25, 40, 50, 60, 70 ve 100 oranlarında karıştırılmıştır. Deney programı boyunca çevrimsel direnci etkileyen bazı faktörler (rölatif sıklık, efektif konsolidasyon basıncı, dane

boyutu, doygunluk derecesi vs.) sabit tutulmuştur. Sonuç olarak, ince taneli zeminlerde D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} değerlerinin her birinin azalması sıvılaşmaya karşı çevrimsel direncin giderek azaldığını gösterse de kaba daneli kumlarda bu değerlerin artması sıvılaşma direncinin arttığını göstermiştir. Çakıllı kumlarda ise üniformluk katsayısı (C_u) ile sıvılaşmaya karşı çevrimsel direnç arasında ilişki bulunmuştur yani C_u 'nun artmasıyla sıvılaşma direnci artarken, C_u 'nun azalmasıyla sıvılaşma direnci azalmıştır. Ancak çakıllı kumlarda eğrilik katsayısı (C_c) ya da D_{10} , D_{30} , D_{50} , D_{60} değerlerinin sıvılaşma direnci ile ilişkisi bulunmamıştır.

(Payan et al, 2015) Çakıllı kumların kararlı durum hallerini ve monotonik sıvılaşma davranışlarını incelemek amacıyla; gradasyon, rölatif sıklık (%0 ve %25), izotropik basınç (100,300 ve 500 kPa) konsolidasyon anizotropisi gibi birçok parametre kullanılarak bir dizi CU üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında nispeten düzgün derecelenmiş çakıl ve daha geniş bir aralığı tarayan kum ve kum-çakıl karışımları kullanılmıştır. Deneylerde membran penetrasyon etkisini yok etmek amacıyla karışımlar belirli bir partikül boyuna sahip kum ile çevrelenmiştir. Sonuçlar bu parametler baz alınarak incelendiğinde; numune; rölatif sıklık arttıkça, düşük gerinimlerde maksimum boşluk suyu basıncına ulaşır. Ayrıca çakıllı zeminlerdeki rölatif sıklığın üzerindeki çevre basıncı incelendiğinde artan çevre basınçlarından kaynaklanan dayanım artış yüzdesinin, artan başlangıç rölatif sıklık ile azaldığı gözlemlenmiştir. Gradasyon etkisi incelendiğinde ise çakıl içeriğinin artmasının kararlı durum mukavemeti üzerindeki etkisi çevre basıncının artmasıyla artmaktadır. Sıvılaşma durumunu incelendiğinde ise %60 çakıl içeriğine sahip,%0 rölatif sıklıkta ve 100 kPa çevre basıncı altında, boşluk suyu basıncı oranının 0.9 olarak hesaplanmıştır ve monotonik sıvılaşma gözlemlenmiştir.

(Monkul et al., 2016) İstanbul Şile bölgesinden aldıkları aynı minerolojiye sahip ancak farklı gradasyonlardaki kum ile ince oranı %25 den az olan ve plastik olmayan üç farklı silt ile yaptıkları kum-silt karışımlarının statik sıvılaşma özelliklerini statik üç eksenli basınç deneyi ile araştırmaktadır. Bu kapsamda, zemin gradasyonunun sıvılaşma üzerinde etkisinin yanı sıra normalize pik deviator gerilme (q_{peak}) ile üniformluk katsayısı olan C_u arasındaki ilişkiye de bakılmaktadır. Sonuçlar göstermiştir ki; kullanılan şile kumu incelidikçe (D_{50} azaldıkça) ve daha üniform hale geldikçe (C_u azaldıkça) gevşek rölatif sıklıklarda sıvılaşma direnci de azalmaktadır. Ancak silt ile karıştırılan kumlarda ise tersi bir durum

gözlemlenmekte yani temiz kum kabalaştıkça (D_{50} arttıkça) ve göreceli olarak daha iyi derecelendikçe (C_u arttıkça) siltli kumlar daha sıvılaşabilir hale gelmektedir. Bunun yanı sıra kum gradasyonunun sıvılaşma direnci üzerindeki etkisinin, ince içerik miktarına bağlı olduğu gözlemlenmektedir. Kum gradasyonunun etkisi yaklaşık %5 lik ince içeriğinde fark edilebilir derecedir ve kademeli olarak ince içeriği arttıkça azalmakta ve %25 ince içeriğinde ise etkisinin neredeyse silindiği görülmektedir.

(Hazout et al., 2017) tarafından, %5 plastisite indisinde ve %25 rölatif sıklığa sahip kumlu zeminde drenajlı üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Bu çalışmada gradasyon etkisini gözlemlemek amacıyla farklı ekstrem boyutlarda (D_{maks} ve D_{min}) ve iki farklı ortalama dane boyutunda (D_{50}) örnekler hazırlanmıştır. Deneysel çalışmanın tümünde uygulanan efektif hücre basıncı 100 kPa olarak sabit tutulmuştur. Sonuç olarak, ortalama dane boyutunun (D_{50}) ve ekstrem dane boyutlarının (D_{maks} ve D_{min}) drenajsız kayma mukavemetinde yani sıvılaşma direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve drenajsız kayma mukavemetinin belirlenmesinde deneysel prosedürde belirlenen zemin gradasyonunun uygun parametreler olduğu gözlemlenmiştir.

3.SIVILAŞMA

Bu zamana kadar gerçekleşen sıvılaşma vakalarının büyük kısmında bina ve köprü temellerinin yıkılması, gömülü (atık su şebekeleri, boru hatları vs.) yapılarda yüzeye çıkma, batma veya devrilme gibi hasarlar gözlemlenmiştir. Ancak sıvılaşmanın gerçekleştiği süreç ve yerel zemin koşulları göz önüne alındığında farklılıklar göstermektedir. Bu sebeple sıvılaşma olayı iki ana grupta ele alınmalıdır (Kramer, 2003).

3.1. Akma Sıvılaşması

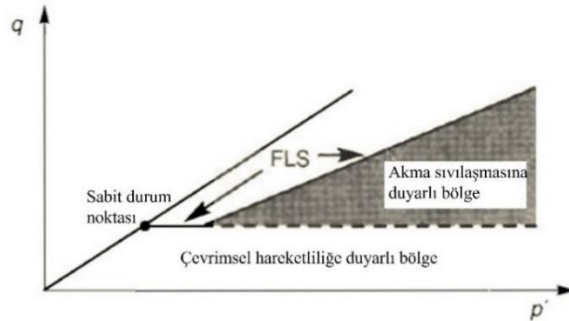
Sıvılaşmış zeminin kayma mukavemetinin zemin kütlelerinin statik dengesi için gereken kayma direncinden küçük olması akma sıvılaşmasını başlatır (Kramer, 2003). Bir diğer ifadeyle, sıvılaşmış zeminin üzerindeki zeminin yer sarsıntısından dolayı meydana gelen dinamik kuvvetlerle statik kuvvetlerin etkimesiyle büyük parçalar halinde ayrılarak zemin yüzeyinin eğimi doğrultusunda hareket etmesidir. (Youd, 1993). Genellikle gevşek suya doymuş kumlarda ve siltlerde eğim açısının 3 dereceden fazla olduğu yerlerde akma gözlemlenir ve bu yanal hareket onlarca metreye kadar ulaşabilir. Akma sıvılaşmaları, aniden ortaya çıkmaları, hızlı gelişmeleri ve sıvılaşan zeminin geniş alana yayılması ile bilinir (Kramer, 2003). Bunlara ek olarak akma sıvılaşması zemin üzerindeki yapı yoğunluğuna bağlı olarak yıkıcı etkileri artmaktadır. Depremler, patlatma, kazık çakma, jeofizik araştırmalar, demiryolu trafiği vs. akma sıvılaşmasını tetikleyebilecek dinamik yüklere örnektir. Koşullar sağlandığı takdirde, gözlemlenen sıvılaşma, sınırsız bir akmaya neden olabilir (Youd, 2003). Bu tür zemin yenilmelerinde, akış yalnızca, itici kayma kuvvetleri (örneğin eğim azalması ile) akan malzemenin viskoz kayma direncinden daha düşük değerlere inmesiyle sonlanır.

Akma sıvılaşmasına örnek olarak, Hollanda Zeeland eyaletinde haliç kıyısında akma yenilmeleri meydana geldi ve bu durum incelendiğinde kayma bölgesinin altında yer alan gevşek granüler bir tabakanın sıvılaşması neden olarak gösterildi. Bir diğer akma sıvılaşması örneği ise Şekil 3. 1’de gösterilen Montana’daki Fort Peck Barajında, hidrolik dolgu inşası esnasında gerçekleşti. Buradaki çalışmalar sonucunda da akma yenilmesinin sebebinin kabuktaki bir kum tabakasının sıvılaşması ve baraj altında da granüler bir tabaka olduğunun kuvvetli olarak tahmin edilmesidir (Youd, 2003).



Şekil 3. 1 Montana Fort Peck Barajı akma yenilmesi (<https://damfailures.org/case-study/fort-peck-dam-montana-1938/>, 5.9.2022 tarihinde erişildi.)

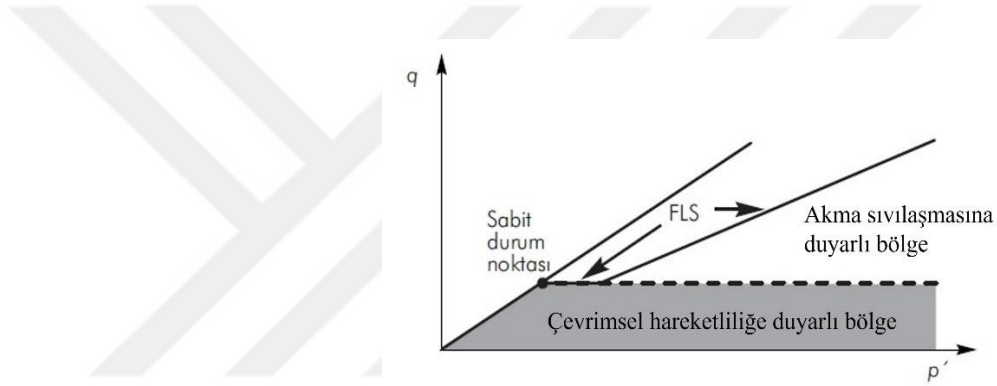
Akma sıvılaşmasının da devirsel hareketliliğinde gerçekleşmesi için gerekli koşul aşırı boşluk suyu basıncının oluşmasıdır. Boşluk suyu basıncında ve dolayısıyla efektif gerilmelerde herhangi bir değişim olmazsa ne akma sıvılaşması ne de devirsel hareketlilik gerçekleşir (Kramer, 2003). Akma sıvılaşmasının başlama şartları en iyi gerilme izi üzerinden açıklanabilmektedir. İki aşamada gerçekleşen akma sıvılaşmasında ilk olarak statik ve dinamik yüklemeye maruz bırakılan zemin kütlelerinde boşluk suyu basıncı artarak efektif gerilmeler akma sıvılaşması yüzeyine (FLS) doğru yaklaşır (Şekil 3. 2). Böylece zemin stabilitesi bozularak kayma dayanımı rezidüel (kalıcı) kayma dayanımı değerine düşer. İkinci aşamada boşluk suyu basıncı çok artmakta olup, statik denge için gerekli kayma gerilmeleri rezidüel kayma dayanımı değerine düşüp yeni bir dengeye oturuncaya kadar sınırsız deformasyon gerçekleşir (Kramer, 2003; Erdoğan, 2011).



Şekil 3. 2 Akma sıvılaşmasına karşı duyarlılık zonu (Steven L. Kramer, 2003)

3.2. Devirsel Hareketlilik

Devirsel hareketlilik akma sıvılaşmasının tersine, statik kayma gerilmelerinin sıvılaşmış zeminin kayma dayanımını aşmadığı durumlarda ortaya çıkmaktadır (Özaydın, 2007). Devirsel hareketlilikle ortaya çıkan yer değiştirmeler deprem sarsıntısıyla kademeli olarak gelişir (Kramer, 2003). Devirsel hareketlilik, yaygın olarak genellikle orta sıkı ve sıkı kumlarda görülmesine rağmen gevşek kumlarda da gözlemlenmektedir (Erdoğan, 2011). Devirsel hareketliliğin meydana gelebilmesi dinamik üç eksenli deneylerdeki zemin tepkileriyle ifade edilebilir. Şekil 3. 3’de gösterildiği gibi devirsel hareketlilik çok düşük efektif gerilmelerden çok yüksek gerilmelere kadar devam etmektedir (Kramer, 2003).



Şekil 3. 3 Devirsel hareketliliğe duyarlılık zonu (Erdoğan, 2011)

Devirsel hareketlilik türü yenilme zemin koşuluna bağlı olarak iki şekilde gruplandırılabilir.

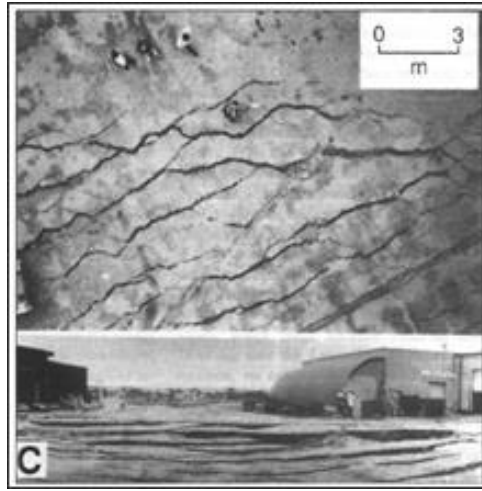
3.2.1. Yanal yayılma

Devirsel hareketlilik şeklinde meydana gelen ve yanal yayılma olarak tanımlanan yer değiştirmeler, deprem esnasında kademeli şekilde gerçekleşir (Kramer, 2003). Yanal yayılma, genellikle sağlam, yüzeysel zemin blokların, yüzey altında bulunan granüler çökelin sıvılaşması sonucu, zemin tabakasının yer salınımı şeklinde ileri-geri hareketlerle veya eğim doğrultusunda hareket etmesiyle tanımlanır (Bartlett and Youd, 1995). Yanal yayılmalar genellikle eğimi %6 dan az olan yamaçlarda veya Şekil 3. 4’de gösterildiği gibi nehir, dere vb. gibi su birikintilerine yakın bölgelerde meydana gelir (Youd, 1993).



Şekil 3. 4 Tumwater'da Sunset gölü karavan parkının batı kısmında meydana gelen yanal yayılma (www.earthquake.usgs.gov, 5.9.2022 tarihinde erişildi.)

Yanal yer değiştirmeler sarsıntının çok yoğun veya uzun süreli olduğu koşullara bağlı olarak birkaç santimetreden birkaç metreye kadar ulaşabilir ve hayati önem arz eden mühendislik yapılarına da ciddi zararlar verebilir (Bartlett and Youd, 1995). Yanal yayılma; kırılma zonunun üzerine inşa edilen yapıların temelini ayırır, boru hatlarını keser, istinat duvarlarını vb. yapıları devirir. Bu hasarlara örnek olarak 1989 yılında gerçekleşen Loma Prieta depreminde, Kaliforniya'daki Moss Landig Deniz Bilimleri Laboratuvarında (MLML) gözlemlenen geniş zemin çatlaklarının yanında binanın ayrılmasını ve deprem sonrasında yapılan incelemelerde, 0 ile 0.65 m arasında arazide alçalma, 1.3 m ye kadar yanal hareketi gözlemlenmesini verebiliriz (Şekil 3. 5).



Şekil 3. 5 Moss Landig Deniz Bilimleri Laboratuvarında meydana gelen yanal yayılma (www.sanctuarysimon.org, 5.9.2022 tarihinde erişildi.)

3.2.2. Zemin dalgalanması

Zemin salınımı bir diğer ifadeyle düz yüzey sıvılaşması, sıvılaşmış alanda veya o alanın içinde ayrılan zemin tabakalarına etki eden atalet kuvvetine tepki şeklinde düz arazilerde gerçekleşir. Bu ayrılma, büyük çapta yer hareketlerinin gelişmesine sebep olurken, kalıcı yer değiştirmeler çok küçük ve düzensiz olmaktadır (Youd, 2003). Düz yüzey sıvılaşması, deprem sırasında oluşan aşırı boşluk suyu basıncının sönümlenme aşamasında suyun yukarı yönlü hareketidir ve buna ek olarak hidrolik denge sağlanana kadar da gözlemlenir. Kum kaynamalarını da bu tip sıvılaşmaya dahildir (Kramer, 2003).

3.3. Yenilme Kriteri

Mohr-Coulomb yenilme kriteri ara asal gerilme olan σ_2 'nin etkisini ihmal ederek, izotropik bir malzemenin yenilme koşullarını açıklayan ana gerilim uzayındaki doğrusal denklemdir. Mohr-coulomb kriteri en büyük asal gerilme olan σ_1 'in ve en küçük asal gerilme olan σ_3 'ün veya normal gerilme σ 'nın ve kayma gerilmesi τ 'nun bir fonksiyonu olarak yazılabilmektedir. Mohr'un koşulu, yenilmenin sadece σ_1 ve σ_3 'e bağlı olduğu kabulünü yapar ve yenilme zarfının şekli de σ ve τ 'nun konumuna göre doğrusal ya da doğrusal değildir (Labuz and Zang, 2012).

Coulomb ise yaptığı çalışmalarda kayma direnci ve kayma sürtünmesi ile ilgilendiği için geliştirdiği eşitlik kayma direnci parametrelerini olan kohezyon, c ve içsel sürtünme açısı ϕ 'yi de içerir ve yenilmeye sebep olacak olan kritik σ ve τ kombinasyonun belirlenmesi doğrusal bir yenilme zarfına dayanır (Labuz and Zang, 2012; Holtz vd.,2015). Sonraki yıllarda ise her iki bilim adamının yaptığı bu çalışmalar birleştirilerek, Mohr-Coulomb kriteri Denklem 1'deki gibi belirlenmiştir.

$$\tau_{ff} = \sigma_{ff} \tan \phi + c \quad (1)$$

Burada τ kayma gerilmesini, σ normal gerilmeyi, ϕ içsel sürtünme açısını, c ise kohezyonu ifade etmektedir.

Mohr-Coulomb yenilme kriteri laboratuvar verilerinin geometrik olarak temsilinin kolayca yapılması, matematiksel olarak basit bir yaklaşım sunması ve bunun yanı sıra zeminlerin yenilme düzlemindeki gerilme değerlerinin de bulunduğu tek bağıntı olması sebebiyle geoteknik mühendisliğinde birçok

sorunun çözümünde çok avantajlı bir yöntemdir (Labuz and Zang, 2012; Holtz vd., 2015).

3.4. Sıvılaşmayı Başlatan Parametreler

Yıllar boyu yapılan çalışmalar sonucunda zemin sıvılaşması olayının üç ana faktöre bağlı olduğu görülmüştür. Bu faktörler; aşırı boşluk suyu basıncı, kesme mukavemeti ve zeminin kayma şekil değiştirmesi-deformasyonudur (Wu et al., 2004). Ancak bu ana faktörlerin sıvılaşma durumuna gelebilmesi de zeminin gradasyonuna, sıklığına, doygunluk derecesi gibi birçok alt faktöre bağlıdır.

3.4.1. Boşluk suyu basıncı oranı

Genellikle, doygun bir zemin elemanını boşluklarındaki su ya zeminin fiziksel konumu sebebiyle ya da dış kuvvetlerin etkisiyle basınç altında olacaktır. Bu basınç, boşluk suyu basıncı veya boşluk basıncı u 'dur.

Boşluklu zeminler, yapıları gereği bünyelerinden sıvı/gaz akışına izin verirler. Boşluk suyu, statik veya yarı statik yükleme koşullarında sadece hidrostatik basınçlara dayanabilir. Boşluk suyu basınçları üç eksenli deneylerde doğrudan bir manometre yardımıyla veya bir transducer (basınç dönüştürücü) ile ölçülür bunula beraber herhangi bir düzeltme gerektirmez. (Lade, 2016)

Zemin sıvılaşmasında boşluk suyu basıncı faktörü incelendiğinde, genellikle aşırı boşluk suyu basıncı oranının (ru) 1.0'a eşit olduğu durum olarak tanımlanır. Boşluk suyu basıncı oranı ise; çalışmalardan elde edilen boşluk suyu basıncı artışı Δu 'nun, başlangıçtaki en küçük efektif asal gerilmeye (σ'_{3c}) oranıdır. "İlk sıvılaşma" veya "kısmi sıvılaşma" tanımları da ru değerinin 1.0'e eşit olduğunu belirtmek için kullanılmaktadır. Ancak yapılan çalışmalarda ru değerinin katı bir şekilde 1.0 e eşit olmasının çok doğru bir yaklaşım olmadığı bazı zeminler için 0.90-0.95 ru değerinde de sıvılaşma gerçekleştiği görülmüştür (Wu et al., 2004).

3.4.2. Dayanım faktörü

Deprem gibi sismik tehlikelerden kaynaklı kimi olaylar; üst yapılarda, şev veya toprak dolguların genel stabilitesi için önem arz etmektedir. Bir

zeminin dengesi için gerekli olan kayma gerilmesi eğer ki kayma dayanımından büyükse orada duraysızlık ortaya çıkar.

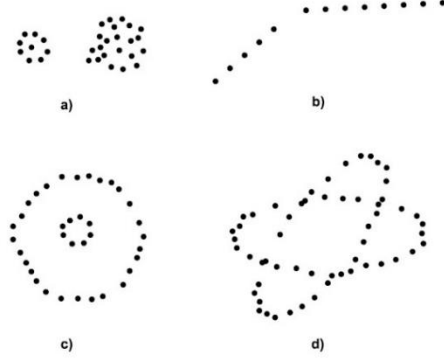
Bu sebeple dayanım faktörü, sıvılaşma gibi duraysızlık örneklerinin değerlendirilmesinde çok etkilidir. Zeminler efektif bir çevre gerilmesiyle dayanım kazandıkların dolayı, sadece efektif çevre gerilmesi sıfır olduğunda dayanımlarını tamamen kaybederler. Dolayısıyla, sıvılaşan zemin viskoz bir sıvı gibi davrandığında kayma dayanımlarını neredeyse tamamen kaybederler ve kalıcı deformasyonlar ortaya çıkar. Bununla beraber sıvılaşmadan kaynaklı stabilite problemlerinin yani duraysızlıkların doğru şekilde belirlenebilmesi için zeminin kayma dayanımının da doğru şekilde belirlenmesi gerekmektedir (Kramer, 2003; Wu et al., 2004).

3.4.3. Şekil değiştirme/deformasyon faktörü

Sıvılaşmayı gerçekleştiren faktörlerden bir diğeri kayma şekil değiştirmesi veya kayma deformasyonudur. Ulusal Araştırma Konseyi, kohezyonsuz doymun zeminlerin aşırı deformasyonunu kapsayan tüm olaylara “sıvılaşma” tanımını kullansa da araştırmacılar bu olayların “sıvılaşma” ve “yenilme” olarak ayrımını yapmıştır. Dolayısıyla geniş deformasyon genliğinde deformasyona karşı direnç olmadığında zeminin sıvılaştığı; uygulanan gerinimler sebebiyle aşırı deformasyona maruz kalan zeminin ise yenildiği kabul edilmektedir. Kayma deformasyonu, sismik performans değerlendirme için de iyi bir kriter olmaktadır. Bu sebeple, kayma gerinimi/deformasyona bağlı sıvılaşma tanımı, sıvılaşma meydana gelirse zeminlerin performansları hakkında dolaylı bilgi vermektedir. Ancak bazı sınırlamaları vardır. Bu sınırlama ise; kayma deformasyon ölçümünün zeminin maruz kaldığı deformasyon moduna bağlı kalmasıdır. Dolayısıyla farklı deformasyon modları için farklı gerinim koşulları seçilmelidir. Bu seçimin ölçülen sıvılaşma direnci veya çevrimsel mukavemet üzerindeki etkisi, gevşek zeminlerde önemsizken sıkı zeminlerde oldukça önemli olmaktadır. Dolayısıyla sıkı zeminlerin sıvılaşma dirençleri, sıvılaşmanın başlatılması için kriter olarak belirlenen şekil değiştirme seviyesine çok duyarlıdır (Wu et al., 2004).

4.KÜMELEME ANALİZİ

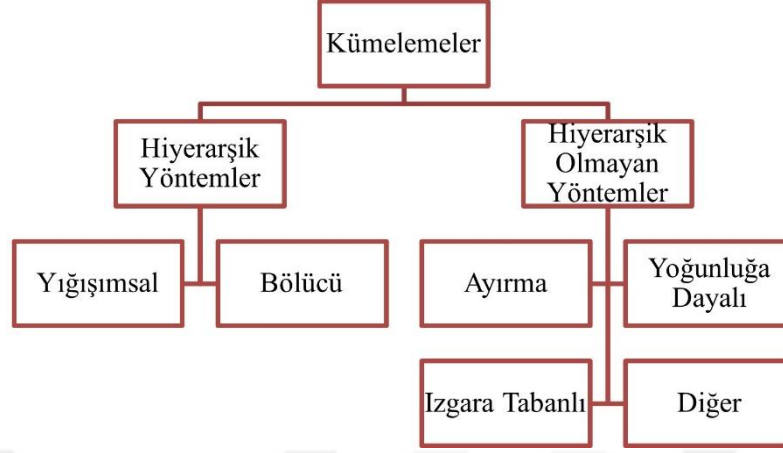
Kümeleme analizi, birçok verinin, gözlemin ya da benzer nesnelere bir araya getirilerek gruplandırılmasını ifade eder. Küme analizinde elemanlar çok boyutlu uzayda noktalar şeklinde temsil edilir, boyutların sayısı ise değişkenlerin sayısı ile tanımlanır (Judd, 1980). Veriler Şekil 4. 1’de temsil edildiği gibi farklı geometrilere ve yoğunlukta olabilmektedir.



Şekil 4. 1 Farklı şekil ve yoğunlukta kümeler (Abonyi and Feil, 2007)

Kümeleme analizleri farklı disiplinler arasında, gerçekten var olduğu kabul edilen gerçek grupları bulması ya da verilerin azaltılmasında sağladığı kolaylık bakımından oldukça faydalıdır. Ayrıca küme analizlerinde beklenmeyen gruplar oluşuyorsa da bu kendi içinde araştırılması gereken ilişkiler ortaya çıkarabilir (Monly and Alberto, 2017). Kümeleme, bir değişkeni sınıflandırmaya veya tahmin etmeye çalışmaz. Kümeleme algoritmaları tüm veri kümesini, küme içindeki benzerliğin maksimum olduğu ve küme dışındaki verilerle de benzerliğin minimum olduğu, homojen alt gruplara veya kümelere ayırmaya çalışır (Larose, 2005). Benzerliklerin hesaplanması sırasında Öklidyen mesafesi, Manhattan mesafesi, Minkowski mesafesi gibi yöntemler kullanılabilir. Mesafe yöntemlerinin kullanılmasının amacı, grup olmayan veriler arasındaki uzaklığa göre benzerlik elde etmektir (Gülağız ve Şahin, 2017). Kümeleme analizi için birçok kriter ileri sürülmüştür ancak kümeleme için sadece tek bir kriter seçmek uygun değildir. Bunun yanı sıra veri setlerini farklı kriterlerle birkaç kez kümelemek veri yapısının farklı yönlerini ortaya koymak açısından daha iyi bir yoldur (Anderberg, 1973). Veri madenciliğinde gelişmiş çok sayıda kümeleme yöntemi vardır. Şekil 4. 2’de gösterildiği üzere kümeleme yöntemleri hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan yöntemler olarak iki ana gruba ayrılmıştır. Hiyerarşik yöntemler ise kendi içinde yığılımsal ve bölücü algoritmalar olarak,

hiyerarşik olmayan yöntemler ise kendi içinde ayırma, yoğunluğa dayalı, ızgara tabanlı ve diğer algoritmalar olarak ayrılır



Şekil 4. 2 Kümeleme algoritmalarının sınıflandırılması (Taşkın ve Gökay 2010)

4.1. Hiyerarşik yöntemler

Hiyerarşik sınıflandırmada kullanılan algoritmalar kademeli bir şekilde kümeler oluşturur. Burada Hiyerarşik yönteme ait algoritmalar en çok benzeyen iki nesneyi aynı küme içinde toplar. Ancak bu yaklaşım kümelemeden önce her bir nesnenin karşılaştırmasını yaptığı için yüksek maliyetli kabul edilir (Taşkın ve Gökay, 2010; Gülağız ve Şahin, 2017). Hiyerarşik kümeleme yönteminde, yığışımsal ve bölücü olarak iki kümeleme yaklaşımı vardır.

4.1.1. Yığışımsal (Agglomerative veya AGNES) algoritmalar

Yığışımsal algoritmalarda veri noktalarının kümeleri birbiriyle birleşerek kümeler oluşturmakta olup bu algoritma aşağıdan yukarıya olarak tanımlanır (Gülağız ve Şahin, 2017). Bu kümeleme yaklaşımında her elemanın kendi kümesini oluşturduğu bir kümelemeden başlar. Her işlem basamağında en az iki benzer küme birleştirilerek tüm elemanlar tek bir kümede toplanıncaya kadar küme sayısı azaltılarak yeni bir küme oluşturulur. Yığışımsal algoritmalar iki gruba ayrılmaktadır. Bunların ilki grafik gösteriminin kullanabileceği tek, tam, ağırlık ve ağırlıksız ortalama bağlantı yöntemleridir. İkincisi ise küme merkezlerinin belirlenmesine olanak sağlayan bunun yanında merkez, medyan ve minimum varyans yöntemlerini bünyesinde barındıran bir yöntemdir (Hennig et al., 2016).

4.1.2. Bölücü (Divisice veya DIANA) algoritmalar

Bölücü kümeleme algoritması tek bir kümedeki tüm verilerle başlar ve bu kümeyi tekrarlı şekilde alt kümelere ayırır. Bu ayırma işlemi istenilen küme sayısına ulaşılan kadar devam eder (Kogan et al., 2006; Abonyi and Feil, 2007). Bölücü kümeleme algoritmasının işleyiş mekanizması yığılımsalın tersi olduğundan ötürü de bu algoritma yukarıdan aşağıya olarak tanımlanır (Gülağız ve Şahin, 2017). Bunun yanı sıra bu yaklaşım verileri bölmeden önce tüm bilgileri içerdiğinden ötürü global bir yaklaşım olarak kabul edilir (Hennig et al., 2016).

4.2. Hiyerarşik yöntemler

Hiyerarşik olmayan kümeleme algoritmalarındaki işleyiş verilerin direkt olarak kümelenmesi bakımından hiyerarşik kümeleme algoritmalarından ayrılır. En yaygın olarak kullanılan algoritma ise ayırma yaklaşımında yer alan K-Ortalamlar algoritmasıdır. K-Ortalamlar algoritmasının diğer çeşitleri ise; Bulanık C-Ortalamlar, K-Modları ve K-Medoids algoritmalarıdır. Yoğunluk tabanlı kümeleme algoritmalarında, yoğun şekilde verilen veri alanları küme oluşturur ve bu sebeple rastgele şekillere sahip kümeleri rahatlıkla bulabilir. Yaygın şekilde kullanılan yoğunluk tabanlı algoritmalar ise, DBSCAN (Density-based spatial clustering of applications with noise) ve OPTICS (Ordering points to identify the clustering structure) algoritmalarıdır. Izgara tabanlı kümeleme yaklaşımı, veri noktalarından ziyade hücreleri dikkate alır. Izgara tabanlı algoritmalara örnek olarak STING (Statistical information Grid Approach), STING+, Wave Cluster, CLIQUE ve GDILC (A grid-based density isoline clustering) algoritmaları verilebilir (Taşkın ve Gökay 2010; Gülağız ve Şahin, 2017).

4.2.1. K-ortalamlar algoritması

K-ortalamlar yöntemi, günümüzde birçok alanda pratikliği sayesinde yaygın olarak kullanılan en basit ve klasik bir veri kümeleme yöntemidir (Aggarwal and Reddy, 2014). K-ortalamlar, n tane veriyi k tane kümeye bölen ve her verinin sadece bir kümeye ait olabilmesine imkân veren ikili mantık kullanılarak matrisin öğelerini dikkate alan keskin bir kümeleme algoritmasıdır (Göktepe vd., 2005). Bu şekilde veri bir kümeye ya aittir ya da ait değildir (0 veya 1) ancak bu durum k-ortalamlar yönteminin nokta ve kümeler arasındaki ilişkiyi yeterli derecede yansıtamadığından yöntemin olumsuz özelliklerinden kabul edilir (Göktepe vd., 2005; Hekim ve Orhan,

2011; Nacaroglu vd., 2019). K-ortalamlar algoritmasının bir diğer problemi ise, eğer ki başlangıç noktasının belirlenmesi doğru yapılmazsa kümeleme sonuçlarında değişiklikler olmasıdır. Bununla beraber, veri gruplarının boyutları farklıysa, veri gruplarının yoğunlukları da farklı olacaktır. K-ortalamlar algoritmasının diğer yöntemlere kıyasla daha az karmaşık olmasının yanında bu algoritmanın uygulanması da kolaydır (Gülağız ve Şahin, 2017).

K-ortalamlar algoritması aşağıdaki şekilde ilerler:

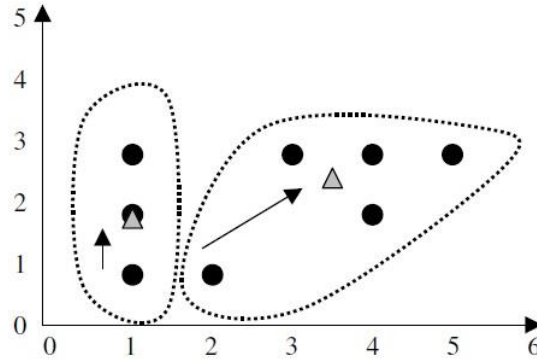
Adım 1: Veri kümesinin kaç kümeye ayrılması gerektiği belirlenir.

Adım 2: Başlangıç küme noktaları belirlenerek rastgele k değeri atanır.

Adım 3: Her veriye ait en yakın küme merkezi bulunur, bu şekilde kümelere ayrılan veriler ait oldukları kümede homojen özellikler gösterir (Şekil 4. 3).

Adım 4: k kümelerinin her biri için küme ağırlık merkezleri bulunur ve her küme merkezinin konumu ağırlık merkezinin değerine göre güncellenir.

Adım 5: kümeler minimum yakınsamaya ulaşınca kadar 3. ve 5. adımlar arasındaki işlemler tekrarlanır (Larose, 2005).



Şekil 4. 3 Kümeler ve küme merkezleri (Larose, 2005)

K-ortalamlar algoritmasının değerlendirilmesinde genellikle karesel hata kriteri (SSE) kullanılır. Bu SSE değeri verilerin ait oldukları kümelerin merkeze olan mesafelerinin kareleri toplamı olup Denklem (3) da formülü verilmiştir (Işık ve Çamurcu, 2007)

$$J = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n d^2(x_i, c_j) \quad (3)$$

Burada; k küme sayısını, n veri sayısını, x_i veri noktasını ve c_j ise küme merkezini ifade etmektedir. Bunlarla beraber karesel hata kriteri (SSE)'in minimum değerde olduğu kümelemelerde en iyi sonuç elde edilir.

4.2.2. Bulanık C-ortalamalar algoritması

Bulanık C-Means (FCM) algoritması, K-Means algoritmasından türetilmiştir (Işık ve Çamurcu, 2007). K-means ve Bulanık C-means algoritmalarının başarısı ise küme merkezlerinin başlangıç değerleri ile ilişkilidir. Dolayısıyla her iki algoritma da farklı küme merkezleriyle tekrar çalıştırılmalıdır (Hekim ve Orhan, 2011).

Bulanık kümelemede elemanlar belirli bir kümeye atanmazlar: kümelerin tamamında veya bazılarında üyeliğin derecesini gösteren bir üyelik fonksiyonuna sahiptirler (Everitt et al., 2011). Bulanık C-means algoritması, bir veri noktasının üyelik değerine göre bir veya daha fazla kümeye ait olmasına izin verir. Bu nedenle, matrisinin elemanları $[0, 1]$ aralığında değişen üyelik değerlerinden oluşur ve bir veri noktasının bir kümeye ne kadar belirsiz veya kesin olarak ait olması gerektiğini de ifade eder (Göktepe, vd., 2005; Oliveira and Pedrycz, 2007). Aynı zamanda bu elemanlara ait üyelik değerinin toplamı da "1" olmalıdır. Sürekli veriler için, bulanık c-ortalamalara neden olan ağırlıklı kareler toplamı kriteri olan kümeleme Denklem 4'de tanımlanmıştır. (Bezdek, 1974; Everitt et al., 2011).

$$J = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n u_{ij}^v d^2(x_i, c_j) \quad (4)$$

Burada; k küme sayısı, n veri sayısı, c_j ise küme merkezini temsil eder. $d(x_i, c_j)$; veri noktası ve küme merkezi arasındaki Öklidyen mesafesini ifade eder. v ise "fuzzifier" olarak adlandırılır ve nihai üyelik dağılımını etkiler. $u_{ij} \geq 0$ $i=1 \dots n$ 'e kadar $\sum_{j=1}^k u_{ij} = 1$ dir.

Bu algoritma döngüsü elemanlar en uygun kümelere yerleştirilinceye kadar devam etmektedir.

4.2.3. Yoğunluk tabanlı algoritmalar

Yoğunluk tabanlı algoritmalarda, veri uzayındaki farklı şekillerde bulunan veriler, veri alanının yoğun bölgelerini bir araya getirilerek kümelenir (Bilgin ve Çamurcu, 2005; Aggarwal and Reddy, 2014). Bir diğer bakış açısıyla tanımlanırsa, bir küme, veri uzayında düşük yoğunluklu alanla çevrelenen yoğun bir alandır. Dolayısıyla böyle bir küme kendi bünyesinde düzensiz şekillere sahip aynı zamanda aykırı değerleri de içinde barındırır (Wierzchon and Klopotek, 2018).



Şekil 4. 4 Yoğunluk tabanlı kümeleme örneği

Şekil 4. 4'da verilen kümeleme örnekleri incelendiğinde her küme içinde, dışardakinden daha yüksek oranda nokta yoğunlaşması görülmektedir. (Ester et al., 1996)

Bu yöntemde en yaygın olarak DBSCAN algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma, 2D veya 3D uzayda veriler arasında komşuluk ilişkisi kurarak çalışmaktadır. Bu yöntemin en zorlayıcı kısmı da bu komşuluk ilişkisinin bulunmasıdır. K-ortalama algoritmasından farklı olarak verileri bir kümeye dahil etmez, istisna verileri süzerek kümeleme yapar. Bir diğer yoğunluk tabanlı algoritma olarak bilinen OPTICS algoritması ise sadece kümeleme için kullanılmaz. Bu algoritma ile görselleştirme çalışmaları da yapılmaktadır (Bilgin et al., 2005) .

4.2.4. Grid tabanlı algoritmalar

Grid tabanlı algoritmalarındaki temel prensip, veri alanını parçalamak için grid benzeri bir yapı oluşturarak, yoğun olan grid bölümlerini az yoğun olandan ayırmaktır. (Hennig et al., 2016)

Genellikle bu algoritma aşağıdaki adımlardan oluşmaktadır.

Adım 1: Bir Izgara yapısı oluşturarak bu yapının hücrelerine ait kümeleri etiketleyin.

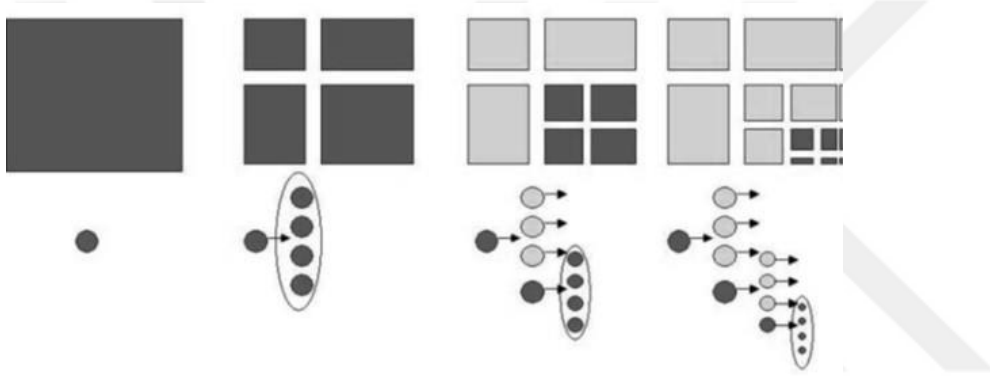
Adım 2: Verilerin bulunduğu alanını sonlu sayıda hücreye bölün.

Adım 3: Her hücre için yoğunluk değerini hesaplayın.

Adım 4: Yoğunluğu belirli bir değerin altındaki hücreleri ise kaldırın.

Adım 5: Küme merkezlerini belirleyerek bitişik yoğun hücre gruplarıyla kümeler oluşturun (Patel and Thakral, 2016; Hennig et al., 2016).

Grid tabanlı kümeleme algoritmasında yaygın olarak STING algoritması kullanılmaktadır. Bu algoritma ile bölge dikdörtgen hücrelere bölünür. Tüm hücreler, bir sonraki işlemde Şekil 4. 5’da gösterildiği üzere daha küçük hücrelere bölünür ve tüm hücrelerin istatistiksel verileri önceden hesaplanmaktadır (Patel and Thakral, 2016).



Şekil 4. 5 Grid tabanlı kümeleme örneği

Grid gibi yapılarda farklı yoğunluktaki elemanları bir araya getirmek daha kolay olduğu için bu yöntem tercih sebebidir (Aggarwal and Reddy, 2014).

5.YAPAY SİNİR AĞLARI

5.1. Yapay Sinir Ağlarının Yapısı ve Temel Elemanları

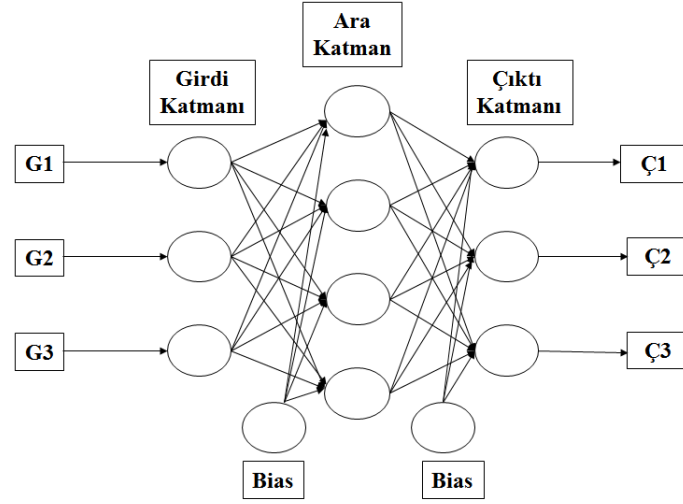
Yapay sinir ağları biyolojik sinir sisteminden etkilenecek geliştirilen ve insan beyninin temel özelliği olan öğrenme fonksiyonunu uygulayan bir sistemdir (Öztemel, 2012).

Yapay sinir ağları, yapılan kabullere dayanarak ortaya çıkan sorunları giderip, girdi ve çıktılarla modelleme yaparak bir ilişki ortaya koymaktadır. Yapılan tekrarlı girdilerle model kendi yapısını ve ağırlığını değiştirmektedir. Yapay sinir ağlarında canlı sinir sistemi gibi içsel ve dışsal uyarmalar ile yapısı değişmekte ve öğrenimi bu şekilde gerçekleşmektedir (Önalp ve Arel, 2011). Modellenen olan ağın yapısının belirlenmesinde; ağ parametrelerinin seçiminde, belirli bir standardın olmaması, problemlerin yalnızca sayısal bilgiler ile gösterilmesi, eğitimin nasıl biteceğinin tahmin edilememesi ve ağ davranışının açıklanamamasına karşın yapay sinir ağlarının kullanımına olan ilgi sürekli olarak artmaktadır (Öztemel, 2012).

Bir sinir ağında örnekleme verileri ne kadar geliştirilebilir ise etkisi de o derece güçlü olmaktadır (Önalp ve Arel, 2011). Bununla beraber ağın bir olayı öğrenebilmesi yapay sinir ağı modelinin doğru seçilmesiyle mümkündür. Bu zamana kadar birçok sinir ağı geliştirilmiş olup, ağ modelini; ağın topolojisi, kullanılan toplama fonksiyonu, kullanılan aktivasyon fonksiyonu, öğrenme stratejisi ve öğrenme kuralı karakterize etmektedir (Öztemel, 2012).

5.2. Yapay Sinir Ağı Modelleri

Yapay sinir ağlarının günümüzde en yaygın olarak kullanılan modeli çok katmanlı algılayıcı (ÇKA) ağlarıdır. Bu ağlar, özellikle mühendislik problemlerinin %95'ine çözüm üretebilecek nitelikte bir ağdır. Bu ağları Şekil 5. 1' gösterildiği üzere üç katmandan oluşmaktadır:



Şekil 5. 1 Yapay sinir ağı mimari yapısı (Önalp ve Arel, 2011)

- Girdi katmanı; herhangi bir bilgi işleme gerçekleşmeden, sadece dışarıdan verileri alır.
- Ara katmanlar; girdi katmanından gelen bilgileri işler. Bir ara katman ile birçok problemin çözümü mümkün olmakla beraber, eğer ağın öğrenmesi istenen problemde girdi-çıkı arasında doğrusal olmayan bir ilişki varsa birden fazla ara katman da kullanılabilir.
- Çıktı katmanında ise; ara katmandan gelen bilgileri işleyerek ağa girdi katmanından sunulan veriler için ağın ürettiği çıktıyı bulup bunu dışarıya iletir (Öztemel, 2012).

5.3. Yapay Sinir Ağlarının Geoteknik Problemlerde Kullanımı

Yapay sinir ağlarının geoteknik alanında kullanımı ise 1990'lı yıllara dayanmaktadır. Yüksek başarı oranı sebebiyle de günümüzde birçok problemin çözümü için yaygın olarak kullanılmaktadır. Geoteknik parametreler; çevre faktörleri, boşluk suyu basıncı, dinamik özellikler gibi birden fazla değişkenle kontrol edilebilmektedir. Bu parametrelerin birbiri ile bağımlı ilişkisi de istatistiksel yöntemlerin kullanımını zorlaştırmaktadır. Ancak yapay sinir ağları ile geliştirilen yöntemler ile eldeki veri grupları temel alınarak geoteknik parametrelerin tahmin edilmesi mümkün olmaktadır. Genellikle problemin türüne göre değişen yapay sinir ağlarında belirli oranda bir hata ile sonuca ulaşılabilmektedir. Zemin gibi heterojen,

daneli ve doğrusal davranış göstermeyen malzemeler ve proje uygulanması esnasında yapılan hatalar göz önünde alındığında %5-10 aralığındaki bir hata oranı geoteknik problemlerinde güvenlik katsayılarının yüksek seçilmesi nedeniyle önemsiz kalmaktadır (Önalp ve Arel, 2011). Yapay sinir ağı; geoteknikte arazi karakterizasyonunun tespitinde, temellerin oturma tahmininin yapılmasında, zeminlerin sıvılaşma davranışının incelenmesinde, kazıklarda yük kapasitesinin tahmin edilmesinde, dayanma yapılarında ise tasarım, hareket ve yenilme analizlerinin yapılmasında etkin olarak kullanılmaktadır.



6.GEREÇ VE YÖNTEM

Tez kapsamında yapılan deneyler, Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü zemin mekaniği laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalar için farklı gradasyonlarda özgül ağırlığı 2.65 gr/cm³ olan kuvars kumu Aydınlar Madencilik 'ten temin edilmiştir. Çalışma kapsamında öncelikle birleşik zemin sınıflandırma sistemine (USCS) e göre farklı gradasyonlarda zemin örnekleri hazırlanmıştır. Ardından örneklere ait gradasyon parametrelerinin değişimi, maksimum/minimum boşluk oranı tayini yapılmış ve her bir örnek genel görüşünü Şekil 6. 1'de verilen ELE International Marka Statik üç eksenli basınç deney aleti ile deneye tabii tutulmuştur.



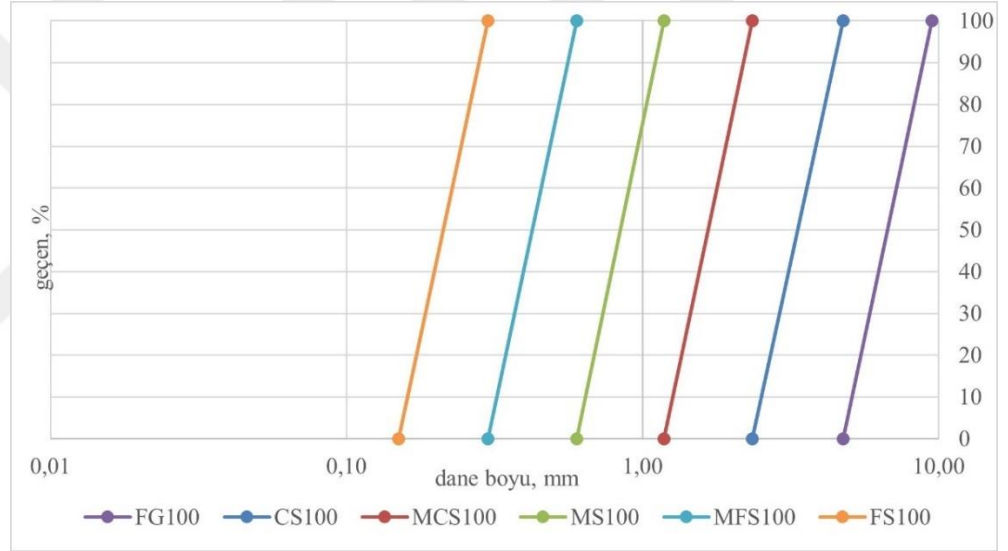
Şekil 6. 1 Deney düzeneğinin genel görünümü

6.1. Zeminlerin endeks özellikleri

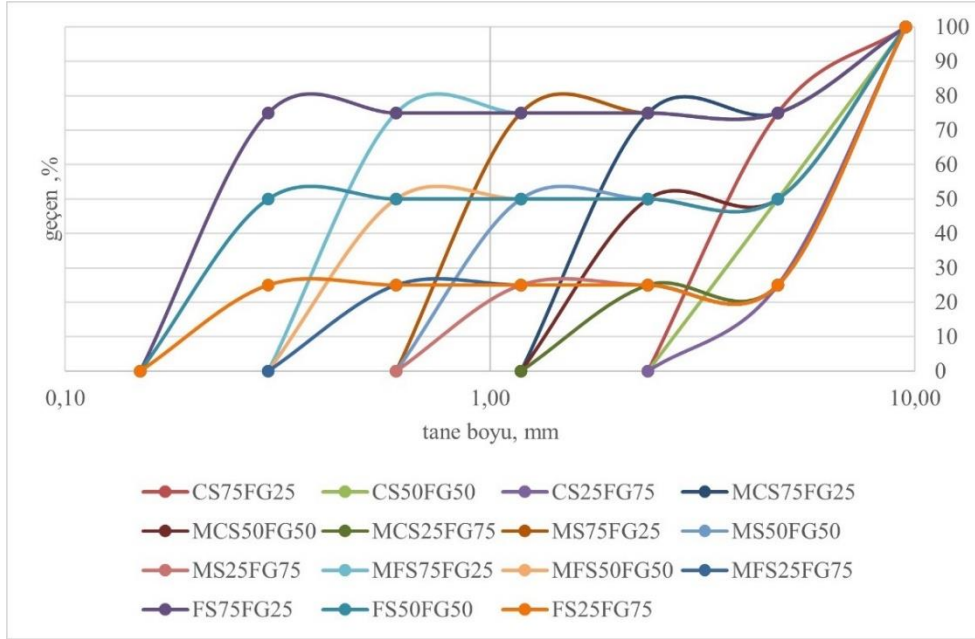
Kum zeminlerin gerilme-deformasyon davranışı genel olarak kumun doğasına ve kumun fiziksel durumuyla ilişkilidir. Kumun doğası, granüler bir malzeme olması nedeniyle genellikle dane boyu dağılımı, ince dane içeriği, dane şekli ve mineralojisi ile açıklanır. Kumun durumunda ise fiziksel koşullar geçerlidir ve rölatif sıkılık, etkin gerilme durumu ile tanımlanır (Cubrinovski and Ishihara, 2002). Bu bilgiler doğrultusunda yapılacak ön çalışmalarda öncelikle kum ve çakıl zeminlerin dane boyu dağılım eğrileri çizilmiştir, ardından da seçilen bir rölatif sıkılık doğrultusunda maksimum ve minimum boşluk oranı deneyleri yapılarak zeminin boşluk oranı belirlenmiştir.

6.1.1. Belli gradasyonda malzemelerin hazırlanması

Zeminlerin özellikle kaba daneli zeminlerin mühendislik davranışında dane çapının etkisi çok önemlidir (Holtz vd., 2015). Bu çalışmada farklı elekler arasında kalan malzemelerin değişik kombinasyonları kullanılarak ince çakıl ve kaba/ince kum aralıklarında Şekil 6. 2’de gösterildiği gibi 6 gruba ayrılmıştır. Ardından sadece kum örneklerine %25, 50 ve 75 oranlarında ince çakıl ilave edilerek (Şekil 6. 3) toplamda 22 grup örnek hazırlanmıştır. Bu örneklerle ait D10, D30, D50 ve D60 çap değerleri ile eğrilik katsayısı (C_c) ve üniformalık katsayısı (C_u) değerleri, Çizelge 6. 1, Çizelge 6. 2 ve Çizelge 6. 3 ‘de değişim grafikleri ise Şekil 6. 4, Şekil 6. 5, Şekil 6. 6 ve Şekil 6. 7’da verilmiştir.



Şekil 6. 2 Üniform zeminlerin gradasyon eğrileri



Şekil 6. 3 Kum-çakıl karışımlarının gradasyon eğrileri

Çizelge 6. 1 İyi derecelenmiş kum ve ince çakılın gradasyon parametreleri

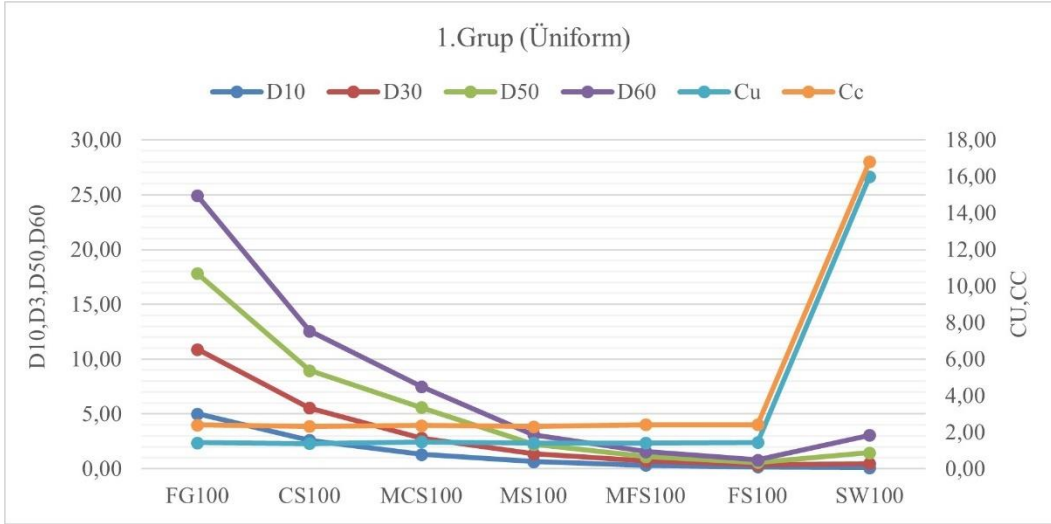
Özellikler	Malzemeler	
	İyi Derecelenmiş Kum (SW)	İnce Çakıl (FG)
D ₁₀	0,10	5,00
D ₅₀	1,00	6,90
D ₃₀	0,30	5,90
D ₆₀	1,60	7,10
C _u	16,00	1,42
C _c	0,81	0,98
e _{max}	0,80	1,05
e _{min}	0,22	0,99
e	0,51	1,02

Çizelge 6. 2 Üniform kumların gradasyon parametreleri

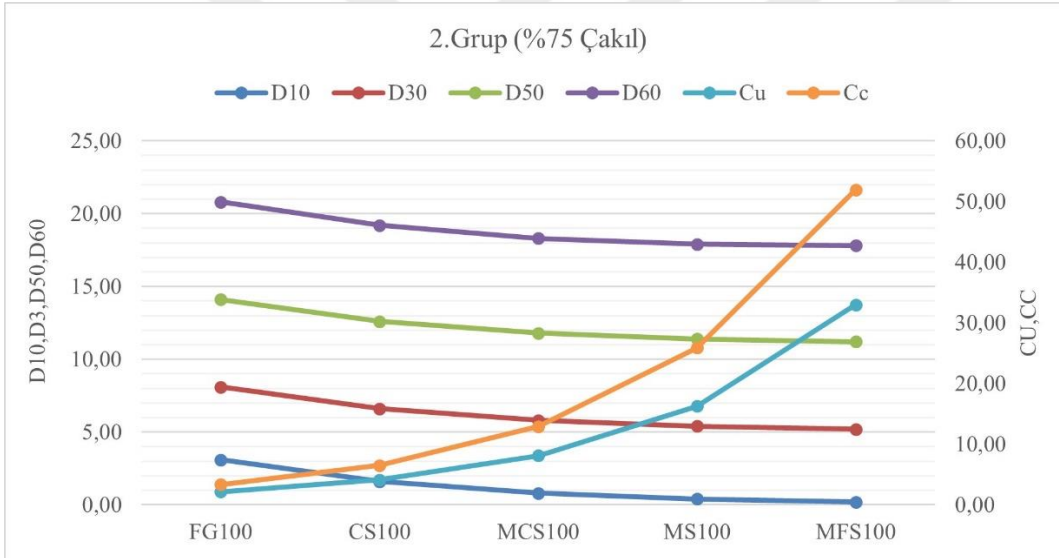
Özellikler	Malzemeler				
	İri Kum (CS)	İri-Orta Kum (MCS)	Orta Kum (MS)	Orta-İnce Kum (MFS)	İnce Kum (FS)
D ₁₀	2,60	1,30	0,64	0,32	0,16
D ₅₀	3,40	2,80	0,85	0,41	0,21
D ₃₀	2,95	1,50	0,72	0,38	0,19
D ₆₀	3,60	1,90	0,90	0,45	0,23
C _u	1,38	1,46	1,41	1,41	1,44
C _c	0,93	0,91	0,90	1,00	0,98
e _{max}	0,91	1,02	0,99	0,81	1,03
e _{min}	0,82	0,55	0,67	0,42	0,68
e	0,86	0,79	0,83	0,62	0,86

Çizelge 6. 3 Çakıllı karışımların gradasyon parametreleri

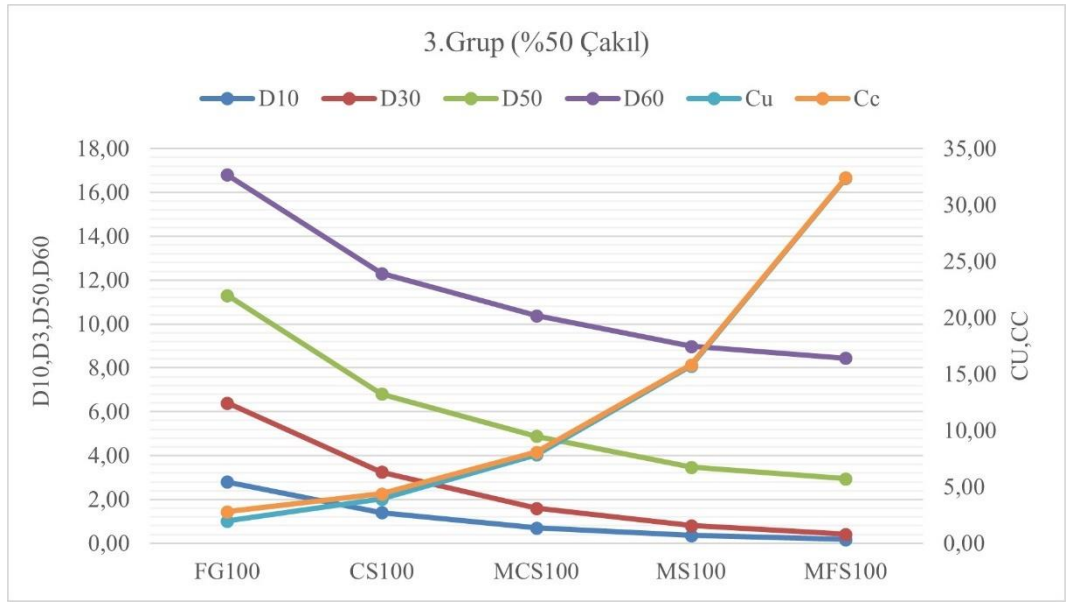
Özellikler	Malzemeler														
	İri Kum (CS)			İri-Orta Kum (MCS)			Orta Kum (MS)			Orta-İnce Kum (MFS)			İnce Kum (FS)		
%	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75	25	50	75
D ₁₀	2,65	2,80	3,10	1,35	1,40	1,60	0,65	0,70	0,80	0,33	0,35	0,40	0,17	0,17	0,20
D ₅₀	3,90	4,90	6,00	1,90	3,55	6,00	0,94	3,28	6,00	0,49	2,68	6,00	0,24	2,53	6,00
D ₃₀	3,10	3,60	5,00	1,65	1,85	5,00	0,80	0,90	5,00	0,40	0,45	5,00	0,20	0,24	5,00
D ₆₀	4,10	5,50	6,70	2,05	5,50	6,60	1,02	5,50	6,50	0,52	5,50	6,50	0,27	5,50	6,60
C _u	1,55	1,96	2,16	1,52	3,93	4,13	1,57	7,86	8,13	1,58	15,71	16,25	1,64	32,35	33,00
C _c	0,88	0,84	1,20	0,98	0,44	2,37	0,97	0,21	4,81	0,93	0,11	9,62	0,90	0,06	18,94
e _{max}	0,99	0,92	1,09	0,96	0,92	0,95	0,86	0,79	0,92	0,70	0,70	0,86	0,72	0,66	0,72
e _{min}	0,54	0,50	0,55	0,56	0,34	0,52	0,55	0,39	0,44	0,41	0,35	0,29	0,57	0,35	0,31
e	0,76	0,71	0,82	0,76	0,63	0,74	0,70	0,59	0,68	0,55	0,52	0,57	0,65	0,51	0,52



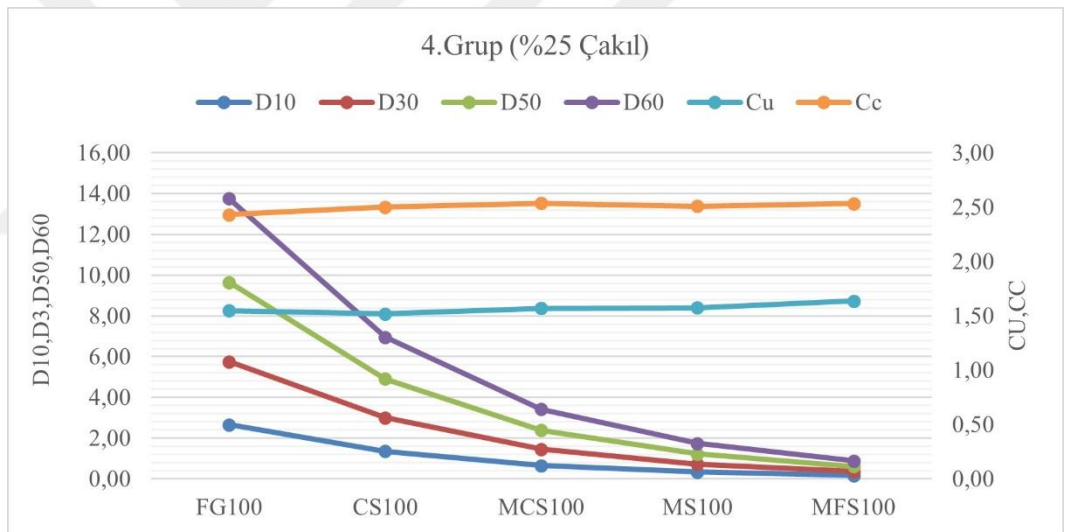
Şekil 6. 4 Üniform zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi



Şekil 6. 5 %75 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi



Şekil 6. 6 %50 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi



Şekil 6. 7 %25 İnce çakıl içeren zeminlere ait gradasyon parametrelerinin değişimi

6.1.1. Maksimum/Minimum boşluk oranlarının belirlenmesi

Kum zeminlerin malzeme özelliklerinin temsil edilebilmesi amacıyla en gevşek ve en sıkı durumlar arasındaki fark olan boşluk oranı aralığı ($e_{maks} - e_{min}$) önerilmiştir. Rölatif sıkılık D_r , bir kum zeminin ne derece yoğun olduğunu gösteren bir durum parametresidir. Bununla beraber boşluk oranı aralığı ($e_{maks} - e_{min}$), dane boyu dağılımı, ince dane içeriği gibi kumun doğal yapısını belirleyen bir parametredir. Aynı şekilde, ($e_{maks} - e_{min}$) ile sıvılaşma analizinde hacim azaltma potansiyeli ölçüsü olarak kullanılan ($e - e_{min}$) ile farklı parametrelerdir. Burada ($e - e_{min}$) de bir durum parametresi olmasına karşın kum zeminlerde indeks yoğunluğunu belirtir (Cubrinovski & Ishihara, 2002). Bu parametrelerin bulunması için de laboratuvarında çeşitli deneyler yapılmaktadır.

Ön çalışmalar için granüler zeminlerde maksimum boşluk oranının (e_{maks}) veya minimum kuru birim hacim ağırlığının ($\rho_{k,min}$) bulunması için belirlenen bir miktarda Şekil 6. 8(a)'da ki gibi 500 gr kuru kum bir hacim ölçer içinde birkaç defa ters-düz edilerek ve düzgün yüzeyli olarak Şekil 6. 8(b) de gösterildiği gibi kumun üst yüzeyinin karşılık geldiği hacim değeri okunmuştur. Üç kez tekrar edilen deney, yakın ölçümler elde edilerek bu değerlerin ortalaması not edilmiştir. Deneyler ASTM D4253-00 standardına göre yapılmıştır.



(a)



(b)

Şekil 6. 8 a) CS75FG25 örneği b) Maksimum boşluk oranı deneyi

Buradan; zeminin minimum kuru birim hacim ağırlığı Denklem 5 de ki gibi hesaplanmıştır.

$$\rho_{kmin} = \frac{M}{V_{maks}} \quad (5)$$

Denklem 5 kullanılarak zeminin maksimum boşluk oranı ise Denklem 6 de hesaplanmıştır.

$$e_{maks} = \frac{\rho_s}{\rho_{kmin}} - 1 \quad (6)$$

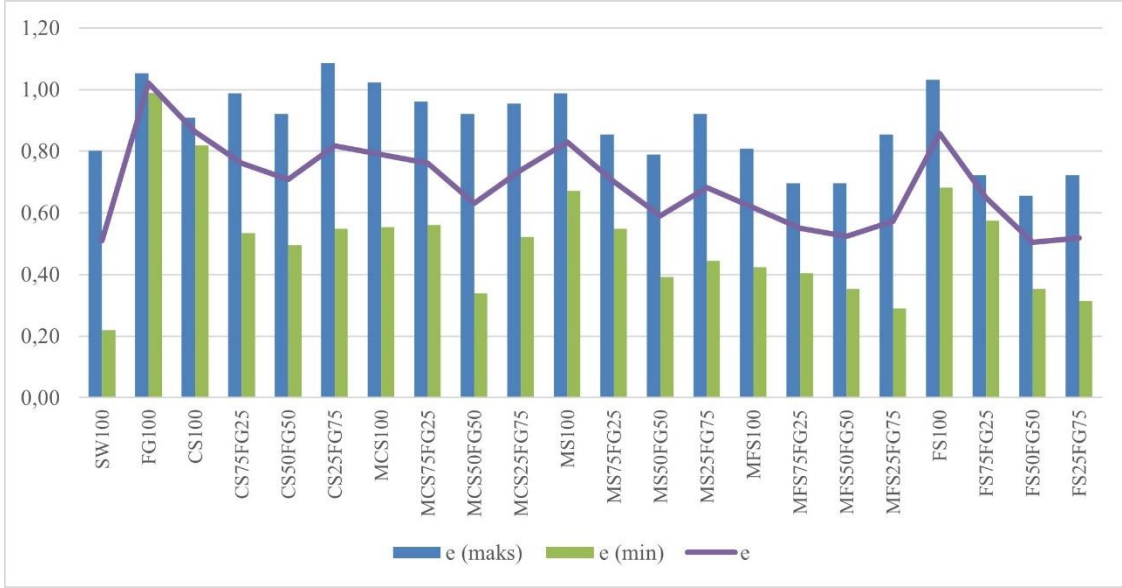
Zeminin minimum boşluk oranı deneyi, ASTM D4253-16 standardı kapsamında yapılmıştır. Sıkıştırma plakası, sürşarj yükü ve sarsma tablasından oluşan sistemde, zemin örneği bir huni yardımıyla tabla içine yerleştirilmiş ve üzerine 14 kPa sürşarj yükü verilmiştir. Bu örnek, 60 Hz frekansla yaklaşık 8 dk boyunca titreşime maruz bırakılmıştır. Sıkıştırma sonrasında ise zemin örneğinin son hacmi (V_s) ile son ağırlığı (W_s) ölçülerek maksimum birim hacim ağırlığı (ρ_{kmaks}) Denklem 7’de gösterildiği gibi hesaplanmıştır. Elde edilen maksimum birim ağırlık kullanılarak da Denklem 8 ‘de verilen minimum boşluk oranı hesaplanmıştır.

$$\rho_{kmaks} = \frac{V_s}{W_s} \quad (7)$$

$$e_{min} = \frac{\rho}{\rho_{kmaks}} - 1 \quad (8)$$

Elde edilen maksimum ve minimum boşluk oranları ve çalışma başında belirlenen %50 rölâtif sıklık değeri kullanılarak, deney örneklerinin boşluk oranı değışimleri Denklem 9'te hesaplanmış olup Şekil 6. 9'te gösterilmiştir.

$$Dr = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \quad (9)$$



Şekil 6. 9 Malzemelerin boşluk oranı

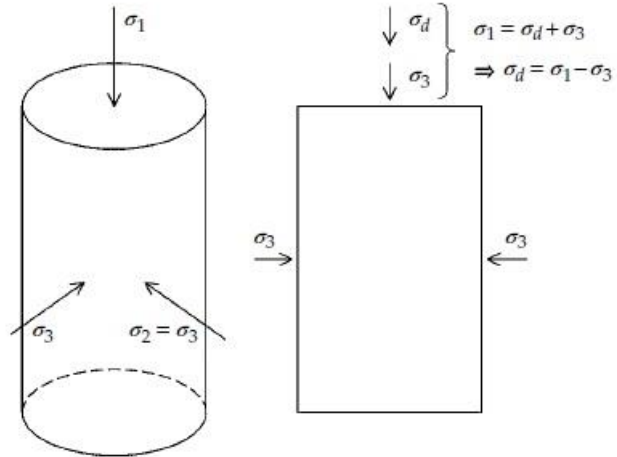
6.2. Üç Eksenli Basınç Deneyi

Üç eksenli deney, kayma dayanımı parametrelerini bulmak amacıyla arazi gerilme durumlarını laboratuvara en iyi yansıtan deneylerden biridir. Bu deney ile zemin, arazi gerilmeleri altında konsolide edilir, zeminin doygunluk derecesi, drenaj durumu kontrol edilir, drenajlı deneylerde hacim değişimi, drenajsız deneylerde ise boşluk suyu basıncı ölçülebilmektedir (Özaydın, 2008; Holtz vd., 2015; Lade, 2016).

Üç eksenli deney Şekil 6. 10'de gösterildiği üzere genellikle silindirik numuneler kullanılarak gerçekleştirilir. Numune için öncelikle çevre basıncı σ_3 uygulanır, bu basınç numunenin her yerine ve dolayısıyla tüm düzlemlere etki eder. Ardından eksenel doğrultuda bir gerilim farkı σ_d , deviatör gerilme uygulanır. Eksenel doğrultuda numune üzerine uygulanan gerilme Denklem 10'da buradan da deviatör gerilme Denklem 11'de hesaplanmıştır.

$$\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3 \quad (10)$$

$$\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (11)$$



Şekil 6. 10 Üç eksenli deneyde silindir numune üzerindeki gerilme durumları (Lade, 2016)

Arazideki zemine genel olarak σ_1 , σ_2 ve σ_3 olmak üzere üç ana gerilme etki etmektedir. Ancak geleneksel üç eksenli deneylerde numune üzerine yalnızca iki farklı gerilme uygulanabilmektedir. Bu şekilde deney numunesi,

iki boyutlu Mohr gerilme dairesinde tam olarak temsil edilebilmektedir. Bunun yanı sıra, ara asal gerilme olan σ_2 , eğer σ_1 'e eşit ise deney üç eksenli çekme(extension) olarak, eğer σ_3 'e eşit ise deney üç eksenli basınç şeklinde olmaktadır.

Üç eksenli basınç deneyi konsolidasyon ve drenaj koşullarına göre üç çeşit olarak aşağıda sunulmuştur.

Konsolidasyonsuz-Drenajsız (UU): UU deneyinde zemin numunesine önce çevre basıncı uygulanır. Zemin numunesi arazide konsolide edildiğinden numunenin, araziden alındığı yerdeki mekanik özellikleri içerdiği varsayımı yapılır. Dolayısıyla numune çevre basıncı uygulandıktan sonra kesme aşamasına geçilir. Kesme aşamasında drenaja izin verilmez. Bu nedenle herhangi bir hacim değişimi olmaz. Hacim değişimi olmadığından ötürü deney sonunda boşluk oranı, su içeriği ve kuru yoğunluk ise zemin numunesiyle aynı olmaktadır (Lade, 2016).

Doymuş zemin üzerinde yapılan UU deneylerinde çevre basıncı uygulandıktan sonra konsolidasyona izin verilmediğinden, deney sonunda elde edilen dayanım çevre basıncının büyüklüğünden etkilenmez. yani etkin çevre basıncı, uygulanan çevre basıncına bağlı olmadığı için dayanım uygulanan tüm çevre basınçları için aynıdır (Parry, 2004; Lade, 2016).

UU deneyi arazideki yüklemenin çabuk gerçekleştiği, nispeten zayıf drenajlı veya drenajın olmadığı kohezyonlu zeminler için uygundur.

Konsolidasyonlu-Drenajsız (CU): CU deneylerde, varsa üç veya daha fazla deney numunesi, başlangıçta farklı hücre basınçlarına tabi tutulur çevre basıncı uygulandıktan sonra konsolidasyon aşamasına geçilir. Konsolidasyonun tamamlanmasıyla geri basınç vanası kapatılarak kesme aşamasına geçilir. Kesme aşamasında drenaja izin verilmediği için UU deneyinde olduğu gibi zemin numunesinde herhangi bir hacim değişimi olmaz dolayısıyla deney sonundaki boşluk oranı, su içeriği ve kuru yoğunluk değerleri aynıdır.

CU deneyinde boşluk basınçlarının ölçümü, hem toplam hem de efektif gerilme mukavemeti parametrelerinin bulunmasını sağladığından, deneyin önemini arttırmaktadır. Elde edilen bu iki parametre ile çizilen Mohr

daiereleri her zaman aynı çapa sahiptir ancak birbirlerinden Δu kadar yer değıştirirler. Mukavemet parametresi olarak σ_c , tasarım ve analizde yaygın olarak kullanılmaz ancak, c_u / σ'_c parametresi oldukça faydalıdır.

Genellikle arazi yüklemelerini birkaç günden birkaç haftaya hatta bazı killer için yıl süresince olan nispeten geçirimsiz zeminlerde (kil ve killi topraklar) CU deneyi yapılır.

Konsolidasyonlu-Drenajlı (CD): Bu deneyde konsolidasyondan sonraki kesme aşamasında drenaja izin verilir. Bu aşamada yükleme çok yavaş gerçekleşir ve numunede aşırı boşluk suyu basıncı oluşmaz. Dolayısıyla efektif gerilme de her zaman toplam gerilmeye eşittir. Drenajlı deneylerde zemin numunesi her zaman hacim değıştirir. Eğer hacim olarak büzülme eğilimindeyse numune, boşluk sıvısını (su veya hava) dışarı atar. Hacimce genleşme eğiliminde olanlarda ise zemin numunesi boşluklarına su veya hava emer. Deney sonucunda ise numunedeki su içeriği, boşluk oranı ve kuru yoğunluğu genellikle başlangıçtakinden farklıdır.

CD deneyi doymuş olsun veya olmasın kaba kum ve çakıl içeren her türlü durumda kullanılır. Bunun yanında çok yavaş yapılacak olan yüklemelerde de bazen ince kum ve silt içeren zeminlerde de uygulanmaktadır.

6.2.1. Deney Düzenegi

ELE markalı üç eksenli basınç deney ekipmanları Şekil 6. 11'de sırasıyla 1884-3-1253 seri numaralı yükleme çerçevesi, 1556-4-5367 seri numaralı 1700 kPa'a kadar dayanan hücre, 1818-4-1407 seri numaralı yanal/geri basınç sistemi, su iletim panosu, havasız su tankı (de-air), cazibe ile akış sağlayan su tankı, CO2 tüpü ve MM700 serisi bir dönüştürücüden oluşmaktadır.



Şekil 6. 11 Üç eksenli basınç deney ekipmanları

6.2.2. Deney yöntemi

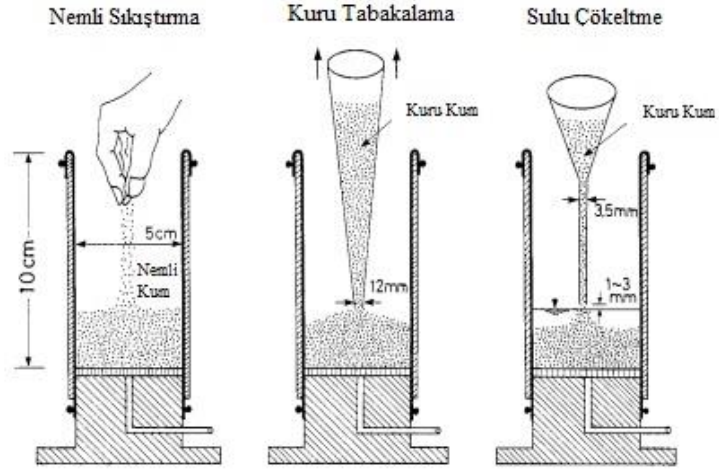
Çalışmalar statik üç eksenli basınç deney düzeneğinde izotropik konsolidasyonlu drenajsız (CU) koşulda ve ASTM D4767-11 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Örneklere 50,100 ve 200 kPa efektif konsolidasyon basıncı uygulanmış olup eksenel yükleme(kesme) aşamasındaki yükleme hızı ise 1 mm/dk olarak belirlenmiştir.

6.2.3. Örnek hazırlama yöntemi

Kum zeminlerin davranışı özellikle tabakalaşma sırasında meydana gelen yapıdan etkilenmektedir (Ishihara, 1996a). Aynı rölatif sıklığa sahip kum

zeminlerin farklı mekanik özelliklerini belirlemek için uygulanan örnek hazırlama yöntemleri ile laboratuvar deneyleri yapılmaktadır (Miura et al., 1982a). Ancak laboratuvar çalışmalarında dikkate alınması gereken en önemli faktör hazırlanan örnekler ile modellenen zemin tabakalarının benzer olmasıdır (Kuerbis and Vaid, 1988). Kumların drenajsız koşullarda nasıl davrandığını belirlemek amacıyla granüler zeminler için örnek hazırlama yöntemleri önerilmiştir (Ishihara, 1996b; Miura et al., 1982b). Bu yöntemler

Şekil 6. 12’da gösterildiği üzere nemli sıkıştırma, kuru tabakalama (kuru yağmurlama) ve sulu çökeltme yöntemleridir.



Şekil 6. 12 Örnek hazırlama yöntemleri

Ancak kum zeminlerde nemli sıkıştırma ve kuru yağmurlama yöntemleri daha sık kullanılmaktadır. Yapılan çalışmalar örnek hazırlama yöntemlerinin zemin davranışı/sıvılaşma direnci üzerinde önemli bir etkisinin olduğunu göstermektedir (Krim et al., 2013; Della et al., 2016). Kuru yağmurlama yöntemi ile hazırlanan örnekler sıvılaşmaya karşı daha büyük bir dirence sahipken, nemli sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan örneklerin sıvılaşma potansiyelleri daha fazladır (Krim et al., 2013; Della et al., 2016). Bu iki yöntem arasındaki davranış farkı, nemli sıkıştırma yöntemi ile hazırlanan örneklerdeki su moleküllerinin aksenal yükleme (kesme) sırasında kolayca sıkıştırılabilen bazı makro gözenekler oluşturmasıyla açıklanabilir (Della et al., 2011). Literatürde yer alan bu çalışmalar doğrultusunda zeminin sıvılaşma potansiyelini belirlemek için örnekler kuru yağmurlama tekniği kullanılarak hazırlanıp deneye tabi tutulmuştur.

6.2.4. Deneyin yapılışı

Örnek Yerleştirme: 70x140 mm boyutlarındaki üç eksenli basınç deney düzeneğinde öncelikle alt başlık üzerine membran yerleştirilmiş ve iki O-ring kullanılarak sabitlenmiş, ardından metal kalıp membran dışına takılarak kap üzerinde bulunan hortuma ortalama 20 kPa'lık basınç uygulanmıştır. Uygulanan bu basınç örnek yerleştirilmeden önce kalıp ile membran arasında var olan havayı ortadan kaldırmak ve 70x140 mm ölçüsünde örnek elde etmek içindir. Ardından alt başlık üzerine önce poroz taşı ve onun da üzerine filtre kâğıdı konularak 7 tabaka halinde zemin örnekleri kuru yağmurlama tekniği ile yerleştirilmiştir. Tabakalar tamamlandıktan sonra önce filtre kâğıdı onun üzerine de poroz taşı koyulur ve üst başlıkta yerleştirildikten sonra membran tekrar iki O-ring ile üst başlığa sabitlenmiştir. Metal kalıba bağlı olan vakum ise örnek dağılmasın diye makinenin “back” kısmına uygulanır. Ardından hücre yerleştirilir ve su ile doldurulur, burada zemin içindeki ve dışındaki basıncı eşitlemek için uygulanan vakum kadar çevre basıncı uygulanarak örneğin doyurulması aşamasına geçilir.

CO₂ ve Su Geçişi: Örnek içine makinenin “pore” kısmından CO₂ verilerek CO₂ den daha hafif havanın tamamen yer değiştirmesi sağlanır (Lade, 2016). CO₂ geçişi zeminin kohezyonlu ya da kohezyonsuz oluşuna da bağlı olarak ortalama 30 dk sürmektedir. Bu süre sonunda CO₂ geçişi durdurulur ve aynı yerden örneğe cazibeyle su verilir. Bu aşama sonunda zemine dışarıdan hortumlarla herhangi bir müdahale yapılmaz.

Hücre-Geri Basınç Uygulama: CO₂ ve cazibeyle su geçirme aşamasından sonra zemine önce 50 kPa'lık artışlarla çevre basıncı verilir ve burada doygunluk yüzdesi olarak ifade edilen B değerinin 0.95 olması beklenir. ASTM standardına göre bu doygunluk yüzdesine ulaşan zeminler doygun kabul edilmektedir. Eğer B değeri doygunluk yüzdesine ulaşmadıysa doyurma işlemi geri basınç verilerek yapılmaktadır. Geri basınç uygulanarak zemin içindeki hava sıkıştırılır ve boşluk suyundaki havanın hacmini küçülterek boşluklara su dolmasını sağlar (Holtz vd., 2015; Lade, 2016). Örneğin doygunluğu tamamlandıktan sonra konsolidasyon aşamasına geçilir.

Konsolidasyon Aşaması: Bu aşamada zemine efektif konsolidasyon basıncı uygulanır ve drenaj vanası açılarak suyun drene olması sağlanır, konsolidasyon aşaması boşluk suyu değeri sabitlenene kadar devam eder ve sonrasında kesme aşamasına geçilir.

Eksenel Yükleme: Konsolidasyonlu-drenajsız (CU) deney yapılacağı için açık olan drenaj vanası eksenel yükleme esnasında kapatılır böylece boşluk suyu basıncı değişimleri ölçülür. 1mm/dk yükleme hızıyla zemin örnekleri %20 eksenel deformasyon yapıncaya kadar Şekil 6. 13'de ki gibi yüklenir. Yükleme sonunda elde edilen tüm veriler bilgisayar ortamında kaydedilir.



Şekil 6. 13 Kesme aşaması

7.SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Üç eksenli deneylerin sonuçları; gerilme-deformasyon, hacim değişimi ve boşluk basıncı diyagramları üzerinden değerlendirilmektedir. Diyagramlar, zemin davranışının ilk değerlendirmesine izin vermektedir. Bu değerlendirmelerde, çevre basıncı (σ_3'), maksimum ve minimum asal gerilme farkı olan deviatör gerilme ($\sigma_1 - \sigma_3$), eksenel deformasyon (ϵ_a), hacimsel deformasyon (ϵ_v) ve boşluk suyu basıncı (u) gibi grafiklerden elde edilen parametreler kullanılmaktadır (Lade, 2016).

Bu çalışma kapsamında kum, çakıl ve kum-çakıl karışımlarının sıvılaşma direnci üzerindeki etkisi araştırıldığından, seçilecek olan deney tipinde sıvılaşmanın gerçekleştiği koşullar etkili olmaktadır. Sıvılaşma olayında; suya doygun ve daneli zeminlerde deprem gibi hızlı dinamik yüklemeler sonucunda, daneler arası su drene olamamaktadır. Bu durum boşluk suyu basıncını arttırarak efektif gerilmeyi sıfırlar dolayısıyla zeminin belli bir tabakasında sıvılaşma meydana gelmektedir. Dolayısıyla çalışma kapsamında ele alınan sorunun çözümü için kullanılacak olan deney tipi drenajsız-konsolidasyonlu(CU) olmaktadır.

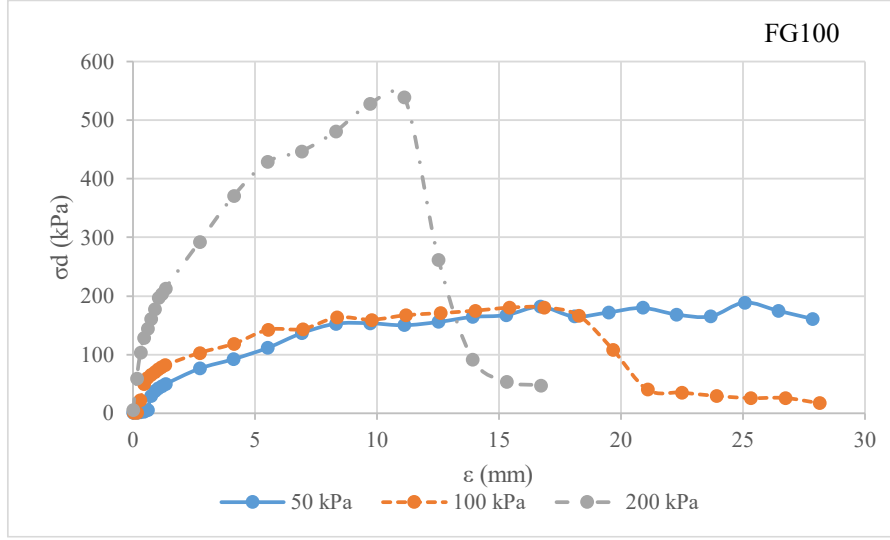
Yapılan deneylere ait sonuçlar aşağıda verilen iki farklı grafik tipi üzerinden sunulmaktadır. Bu grafikler;

- a) Deviatör gerilme- Eksenel Deformasyon ($\sigma_d - \epsilon$)
- b) Boşluk suyu basıncı- Eksenel Deformasyon ($u - \epsilon$)

7.1. Gradasyon Özelliklerinin ve Çevre Basıncının Dayanıma Etkisi

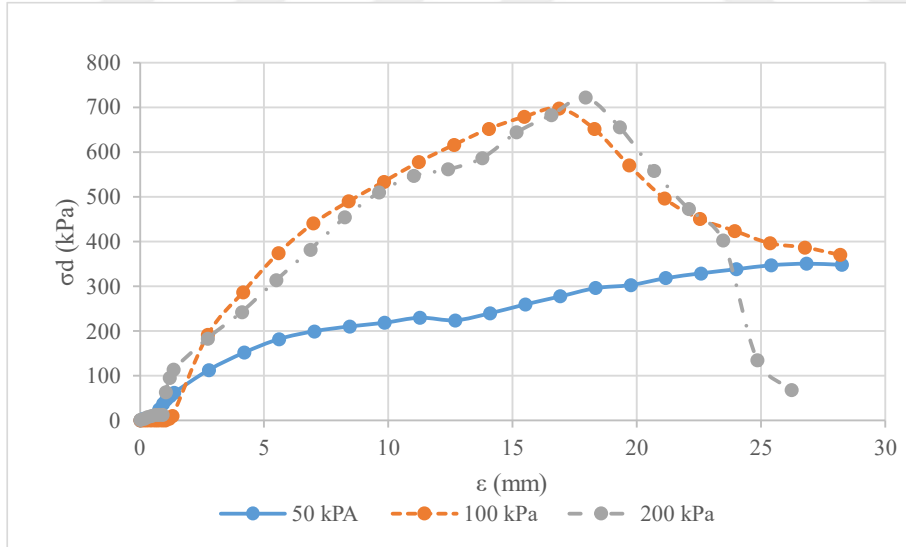
Zemin gradasyon özelliklerinin ve uygulanan çevre basınçlarının dayanım üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla sırasıyla FG100 olarak adlandırılan ince çakıl, MCS100 olarak adlandırılan üniform iri-orta kum, MCS75FG25 olarak adlandırılan %25 ince çakıl içerisinde iri-orta kum-çakıl karışımı, MCS25FG75 olarak adlandırılan %75 ince çakıl içeriğinde iri-orta kum-çakıl karışımı, SW100 olarak adlandırılan iyi derecelenmiş kum, MFS100 olarak adlandırılan orta-ince kum, MFS75FG25 olarak adlandırılan %25 ince çakıl içeriğinde orta-ince kum-çakıl karışımı, MFS25FG75 olarak adlandırılan %75 ince çakıl içeriğine sahip orta-ince kum-çakıl karışımı örnekleri incelenmiştir.

Kumlarda kayma dayanımı zeminin rölatif sıklığı, gradasyonu, dane biçimi, mineral yapısı gibi birçok faktörden etkilenmektedir. Özellikle kohezyonsuz zeminlerde rölatif sıklığın artmasıyla kayma dayanımları altında zemin danelerin kilitlenme etkisiyle sebebiyle hareketleri zorlaşmakta dolayısıyla zeminin kayma direncinde artış gözlemlenmektedir (Özaydın, 2008). İri daneli zeminlerin dayanımını etkileyen en önemli faktör zeminin rölatif sıklığı ve uygulanan çevre basıncı olmaktadır. Bu faktörlere göre bir zeminin rölatif sıklık derecesi ne kadar artarsa dayanımı da artmaktadır. Aynı şekilde uygulanan çevre basınçlarının da artmasıyla beraber aşağıdaki grafiklere de görüldüğü üzere dayanımlarında artış gözlemlenmektedir.



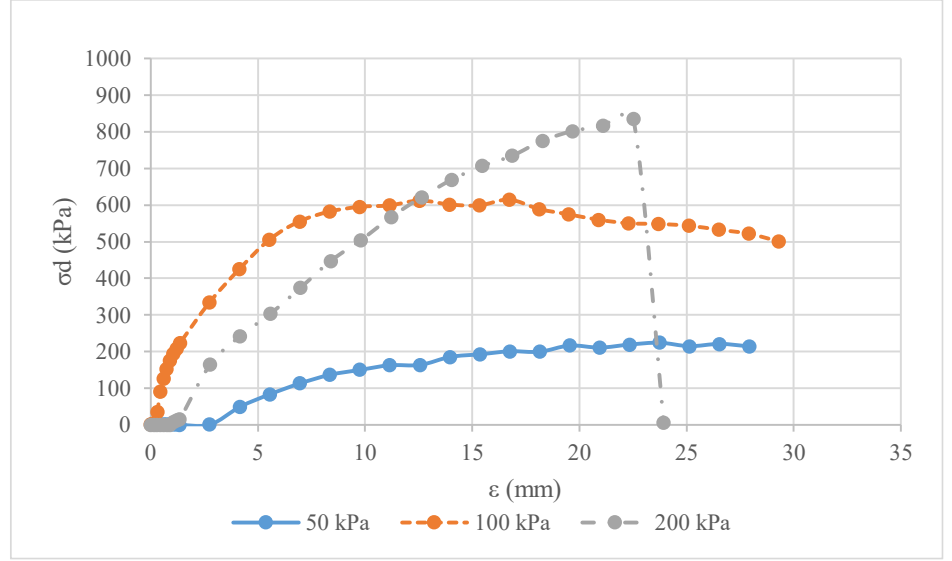
Şekil 7. 1 FG100 örneği gerilme-deformasyon grafiği

Şekil 7. 1 FG100 örneği gerilme-deformasyon grafiği’de ince çakıl üzerinde yapılan üç eksenli basınç deneyinde zemin örneği sırasıyla 50, 100 ve 200 kPa çevre basıncına tabi tutulmuştur. Sonuçlarda 50 kPa çevre basıncı altında zeminin deviyatör gerilme değeri yaklaşık 180 kPa, 100 kPa çevre basıncında 200 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında ise yaklaşık 550 kPa dayanım değerine ulaşmıştır.



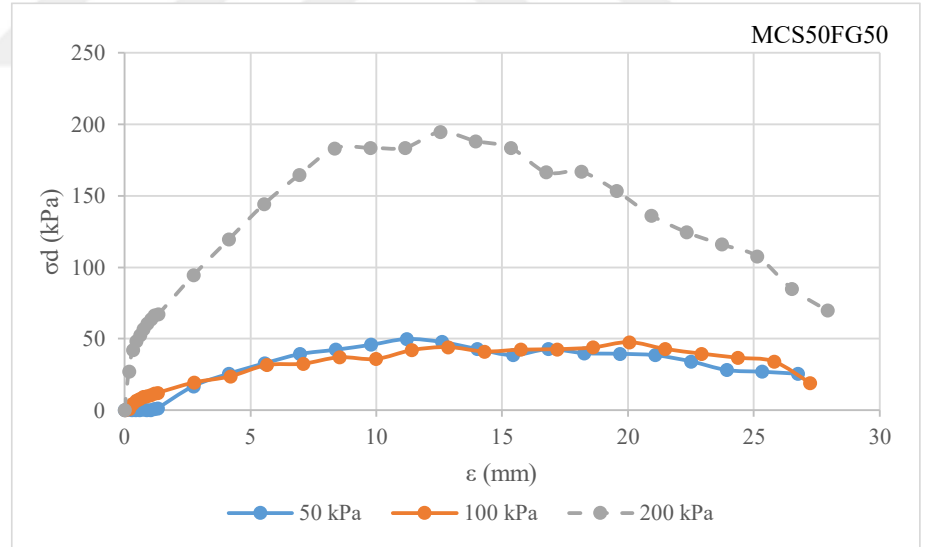
Şekil 7. 2 MCS100 örneği gerilme-deformasyon grafiği

Şekil 7. 2’da iri-orta kum zemin örneğinde yapılan deney sonuçlarına göre uygulanan 50,100 ve 200 kPa çevre basınçları altında ulaşılan maksimum dayanım değerleri sırasıyla 300 kPa, 700 kPa ve 740 kPa olmaktadır.



Şekil 7. 3 MCS75FG25 örneği gerilme-deformasyon grafiği

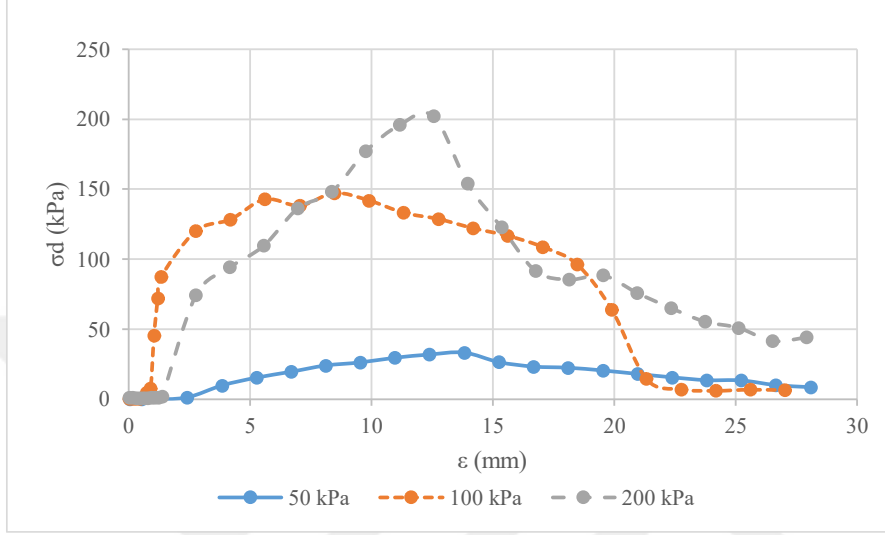
%25 ince çakıl ilavesiyle hazırlanan ve Şekil 7. 3'de grafiği verilen MCS75FG25 örneğinde yapılan deneyler sonunda 50 kPa çevre basıncında ulaşılan maksimum dayanım 200 kPa, 100 kPa çevre basıncında 600 kPa ve 200 kPa çevre basıncında ise 830 kPa olmaktadır.



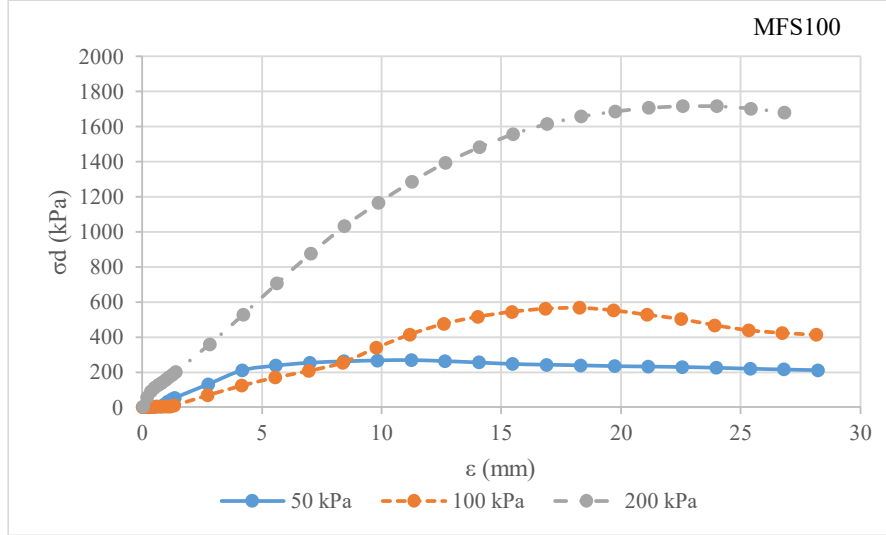
Şekil 7. 4 MCS50FG50 örneği gerilme-deformasyon grafiği

%50 ince çakıl ile hazırlanan ve deney sonuçları Şekil 7. 4'de verilen MCS50FG50 örneğinde uygulanan çevre basınçları altında ulaşılan dayanım sonuçları sırasıyla 40 kPa, 50 kPa ve 200 kPa, %75 ince çakıl ilavesiyle hazırlanan, Şekil 7. 6'de sonuçları verilen MCS25FG75 örneğinde ise dayanım değerleri sırasıyla 40 kPa, 150 kPa ve 210 kPa olmaktadır. Bu bilgiler ışığında çakıl içeriğinin %25 olarak kabul edilmesi zeminlerde

üniforma kıyasla daha fazla dayanım sonucu vermesine karşın %50 ve üzerinde yapılan ince çakıl ilavesi de dayanımı ciddi oranlarda azaltmaktadır. Bunun sebebi olarak membran penetrasyon etkisiyle kullanılan kauçuk membranın zarar görmesi ve tekrarlı kullanımla yıpranmasının dayanımı olumsuz anlamda etkilediğini söyleyebiliriz.



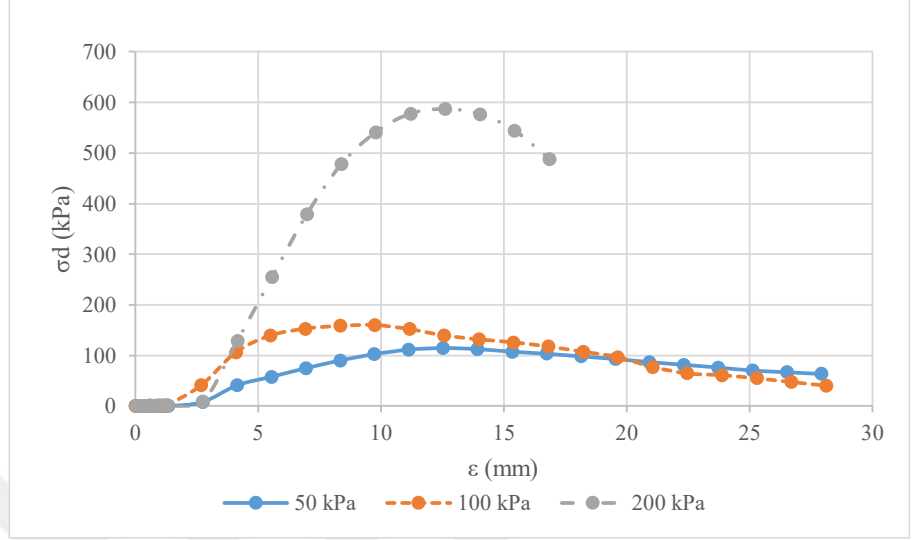
Şekil 7. 6 MCS25FG75 örneği gerilme-deformasyon grafiği



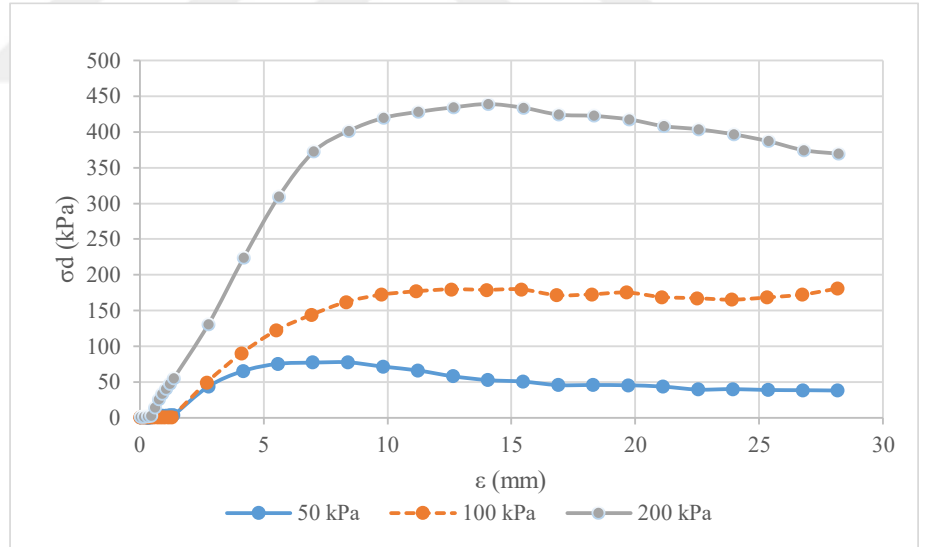
Şekil 7. 5 MFS 100 örneği gerilme-deformasyon grafiği

Şekil 7. 5'de üniform orta ince kum örneğinin deney sonuçları incelendiğinde uygulanan çevre basınçlarına göre sırasıyla elde edilen dayanımlar 210 kPa, 600 kPa ve 1700 kPa olmaktadır. Buna karşın Şekil 7. 7Şekil 7. 8 ve Şekil 7. 9 'de sonuçları verilen ve %25,%50 ve %75 ince çakıl ilavesiyle hazırlanan örneklerde 50 kPa çevre basıncında ulaşılan dayanım

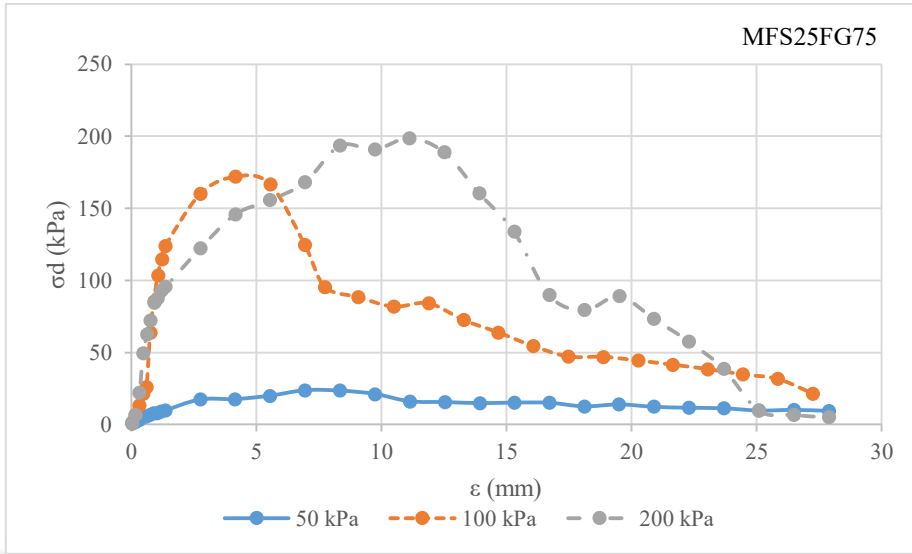
değerleri sırasıyla 110 kPa, 90 kPa ve 40 kPa; 100 kPa çevre basıncında ulaşılan dayanım değeri sırasıyla 180 kPa, 160 kPa ve 130 kPa, 200 kPa çevre basıncında ise dayanım değerleri sırasıyla 600 kPa, 440 kPa ve 200 kPa olmaktadır.



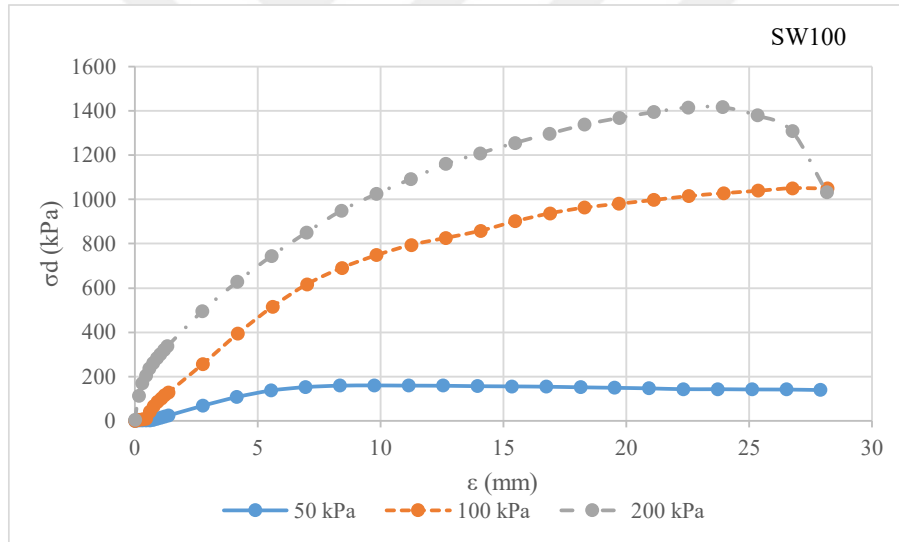
Şekil 7. 7 MFS75FG25 örneği gerilme-deformasyon grafiği



Şekil 7. 8 MFS50FG50 örneği gerilme-deformasyon grafiği



Şekil 7. 9 MFS25FG75 örneği gerilme-deformasyon grafiği

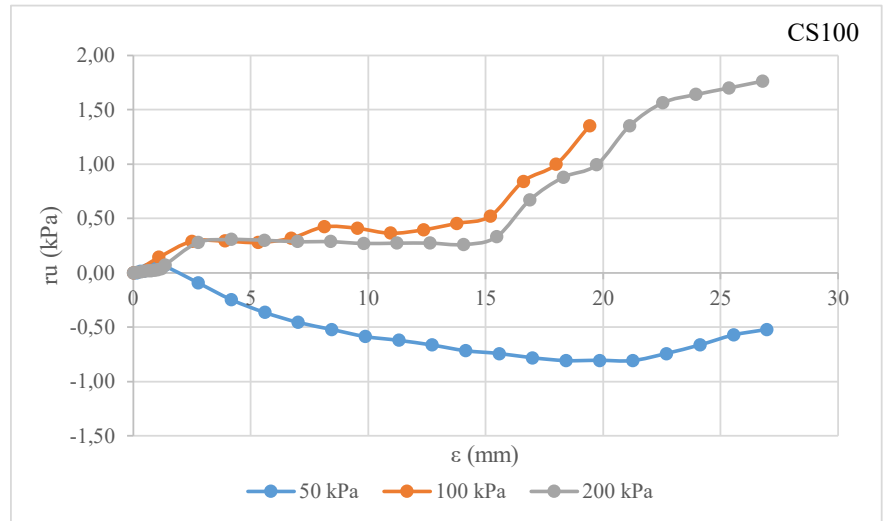


Şekil 7. 10 SW100 örneği gerilme-deformasyon grafiği

Şekil 7. 10'de verilen grafiklerde iyi derecelenmiş zemin örneğinin 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basınçları altında gerçekleşen üç eksenli deney sonuçları verilmiştir. Bu grafiklere göre 50 kPa çevre basıncında zeminin maksimum deviator gerilmesi yaklaşık 200 kPa, 100 kPa çevre basıncı uygulandığında 1050 kPa, 200 kPa çevre basıncı uygulandığında ise 1420 kPa değerine çıkmaktadır. Dolayısıyla bu başlık altında verilen diğer zemin örneklerinin genel karşılaştırılması yapılırsa, iyi derecelenmiş zeminlerde taneler arası kenetlenme kötü derecelenmiş zemine kıyasla daha fazladır bu sebeple daha yüksek içsel sürtünme açısına sahiptir. İyi derecelenmiş zeminlerin sıkıştırılabilirliği kötü derecelenmiş zeminlerden daha azdır. Dolayısıyla iyi derecelenmiş zeminlerde geçirimsizlik daha az, dayanımları ise kötü derecelenmiş zeminlere göre daha fazla olmaktadır.

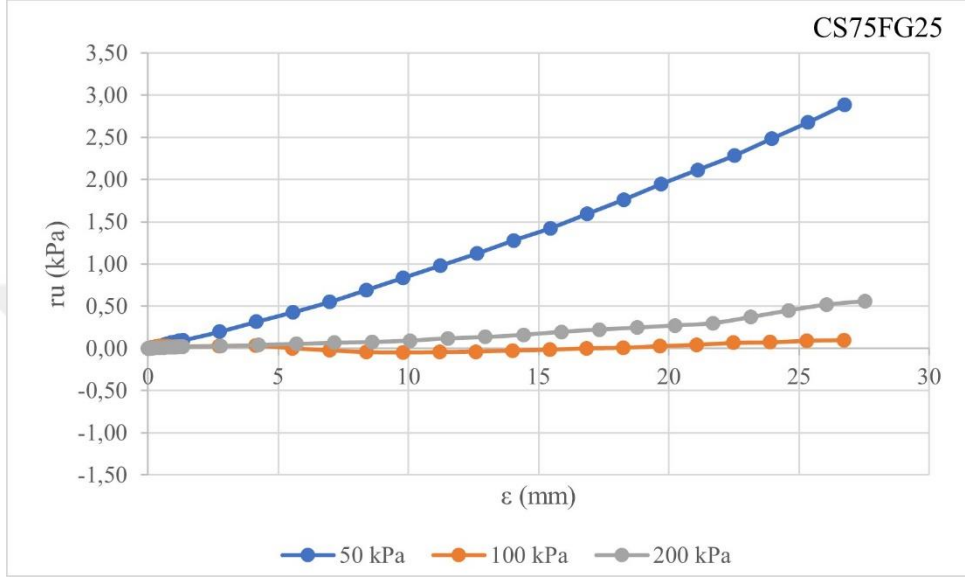
7.2. Sıvılaşmanın Gözlemlenmesi

Genellikle, kum zeminlerin permeabilitesi fazla olduğundan statik yüklemeler altında su zemin boşluklarından dışarıya doğru çıkar, dolayısıyla boşluk suyu basınçları sönümlenir. Ancak dinamik etkilerle yükleme hızlı gerçekleştiğinden, su boşluklardan hemen çıkamaz dolayısıyla boşluk suyu basınçları artar. Zeminlerde oluşan aşırı boşluk suyu basınçları yukarıya doğru bir akım olduğunu gösterir ve sıvılaşma gerçekleşir (Holtz vd.,2015). Sıvılaşma analizi için boşluk suyu basıncı oranı olan r_u değeri 0.90 ile 1.10 arasında olduğu durumlarda sıvılaşma gerçekleştiği kabul edilmiştir. Bu bilgi doğrultusunda yapılan 66 deney örneğinin 8 tanesinde sıvılaşma gözlemlenmiştir.

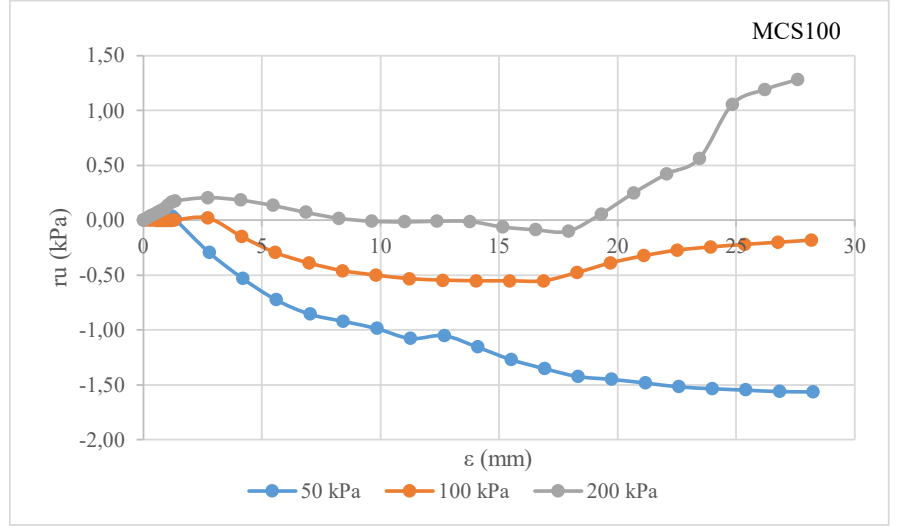


Şekil 7. 11 CS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 11’de grafiği verilen ve CS100 olarak kodlanan üniform iri kum örneğinde 100 kPa çevre basıncında ulaşılan ru değeri 1.00, 200 kPa çevre basıncında ise ru değeri 0.99 olarak bulunmuştur. %25 çakıl ilave edilerek hazırlanan CS75FG25 örneğinde ise Şekil 7. 12’da gösterildiği üzere ru değeri 1.0 olarak bulunmuştur.

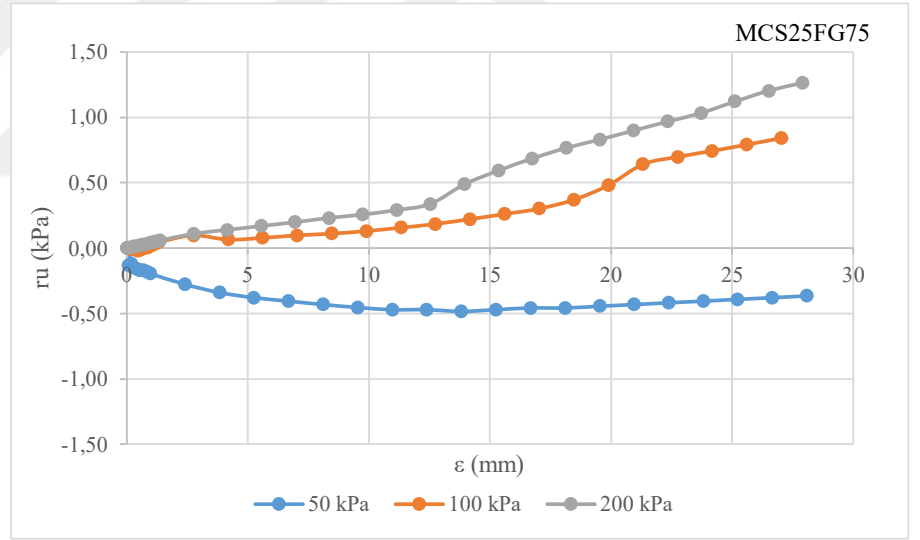


Şekil 7. 12 CS75FG25 örneği boşluk suyu basıncı oranı



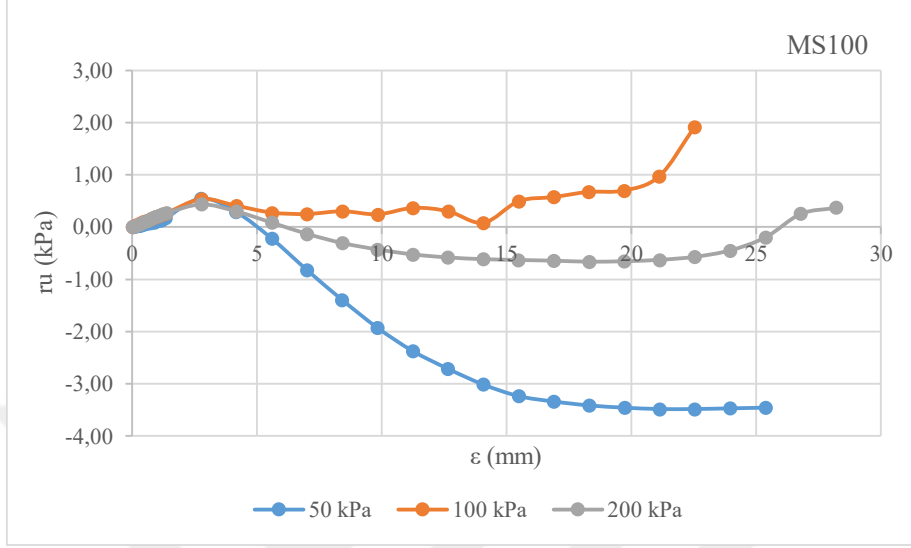
Şekil 7. 13 MCS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 13’da MCS100 olarak kodlanan üniform iri-orta kum için deney sonucu verilmiştir. Buna göre boşluk suyu basıncı oranı değeri 200 kPa çevre basıncında 1.05’e ulaşmıştır.



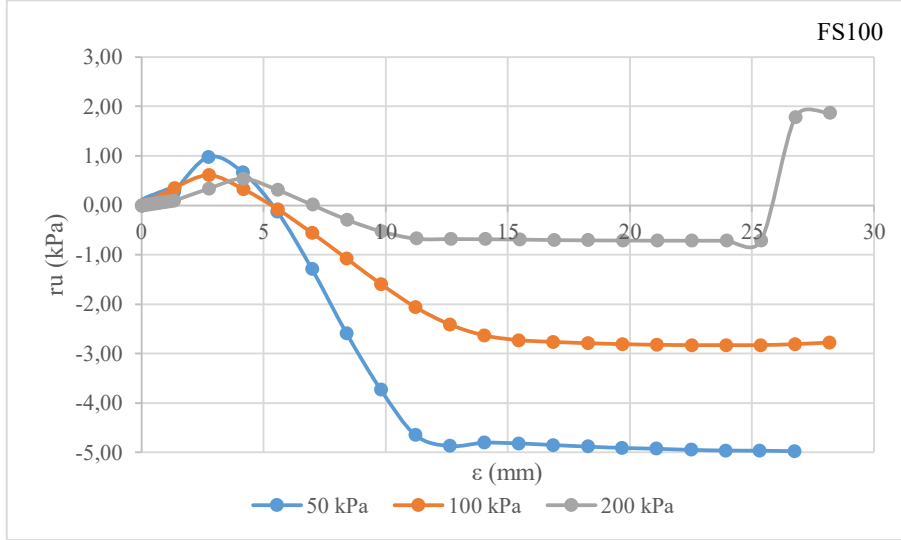
Şekil 7. 14 MCS25FG75 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 14'de %75 çakıl içeriğindeki iri-orta kum- çakıl karışımı örneğinde sıvılaşma 200 kPa çevre basıncında ru değerinin 0.97 olduğu noktada gerçekleşmektedir.



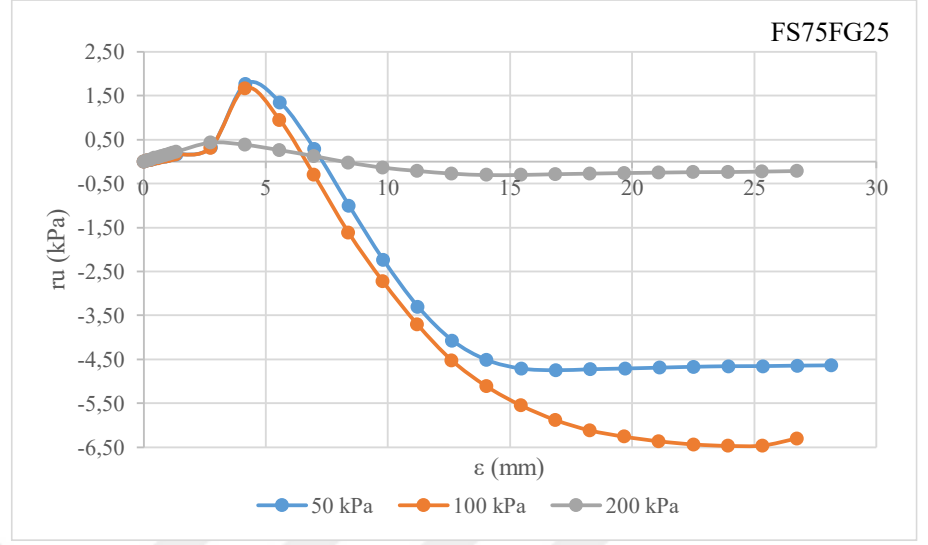
Şekil 7. 15 MS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 15'de üniform orta kum olan MS100'ün sıvılaşma durumu incelendiğinde 100 kPa çevre basıncında boşluk suyu basıncı oranı 0.97 olmaktadır.



Şekil 7. 16 FS100 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 16'de üniform ince kum olan FS100 örneğinde ru değeri 50 kPa çevre basıncında 0.98'e ulaştığı için sıvılaşma gerçekleşmiştir.



Şekil 7. 17 FS75FG25 örneği boşluk suyu basıncı oranı

Şekil 7. 17'te gösterilen %25 ince çakıl içeriğine sahip FS75FG25 örneğinde ise boşluk suyu basıncı oranı ru 100 kPa çevre basıncında 0.95 değerine ulaşmıştır.

7.3. Membran Penetrasyon Etkisi

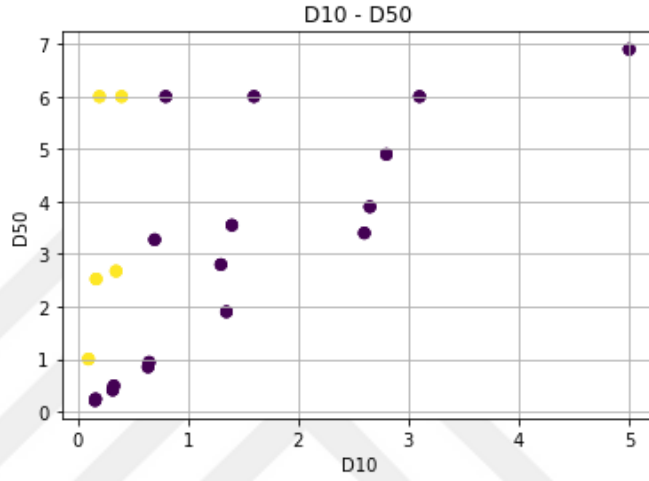
Bir üç eksenli basınç deneyinde zemin numunesine çevre basıncının uygulanması, zemin numunesinin kauçuk membran ile çevrelenip hücredeki sıvıdan izole edilmesiyle mümkün olmaktadır. (Raghunandan et al., 2015). Genellikle kauçuk membran kullanımı, yapılan deneylerde hem ölçülen deviatör gerilme hem de hacimsel değişim verilerinde önemli etkilere sahiptir. Bu nedenle, deney sonuçlarının uygun şekilde düzeltilmesi veya membran penetrasyon etkisini ortadan kaldırmak veya azaltmak için deney prosedürünün değiştirilmesi gerekmektedir (Raghunandan et al., 2015).

Membran penetrasyonunun etkileri; gevşek, doymuş, kaba kum ve çakılların sıvılaşma davranışının değerlendirilmesinde özellikle önemlidir (Kramer et al. 1990). Literatürde membran penetrasyonunu belirlemek amacıyla birçok araştırmacı tarafından farklı yöntemler sunulmaktadır. Bu çalışmaların ortak olarak vardığı sonuçlar incelendiğinde, genel olarak dane boyutunun en önemli faktörlerden biri olduğu görülmektedir. Ayrıca dane şeklinin küçük bir etkisi olmasına rağmen, rölatif sıklığın membran penetrasyonu üzerindeki etkisinin önemli olmadığı görülmektedir (Baldi and Nova, 1985; Raghunandan et al., 2015).

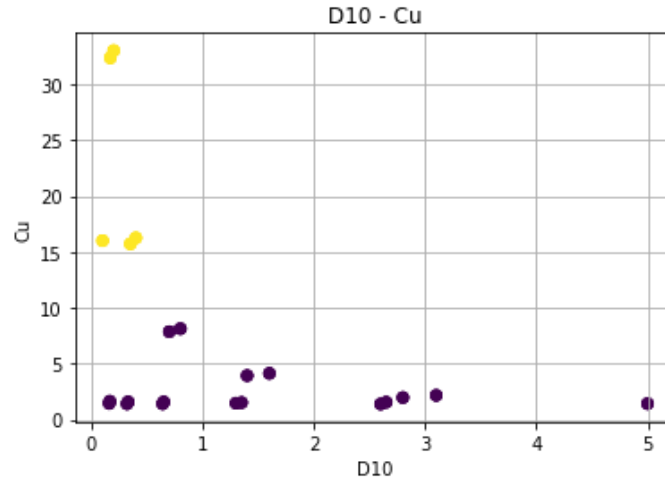
Bu çalışma kapsamında da özellikle iri daneli ve ince çakıl içeriğinin %50 ve %75 oranlarında olduğu orta ve ince kumlarda da membran penetrasyon etkisini gözlemlemekteyiz. Ancak bu etkinin hesaplanması drenajlı deneylerde meydana gelen hacim değişimleri üzerinden olmaktadır, drenajsız deneylerde ise kurucu (constitutive) modellerle veya görüntü işleme teknikleri kullanılarak daha ileri seviyede yaklaşımlarla hesaplanabilir.

7.4. Kümeleme Analizi Sonuçları

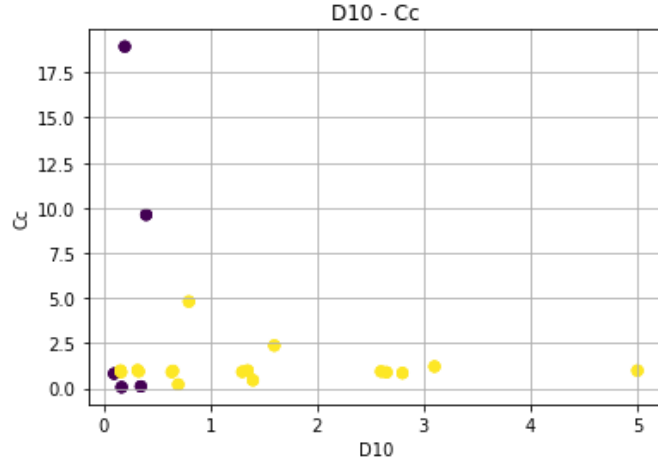
Kümeleme analizi için en iyi sonuçların gözlemlendiği metot k-means metodudur. Buradaki analizler Google Colab üzerinden yapılmıştır. Değerlendirmesi yapılan veriler ise D10,D50,Cu ve Cc dir. Kümeleme analizi D10-D50, D10-Cu, D10-Cc, D50-Cu, D50-Cc, Cu-Cc ikili gruplarıyla Şekil 7. 18, Şekil 7. 19, Şekil 7. 20, Şekil 7. 21, Şekil 7. 22 ve Şekil 7. 23 gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



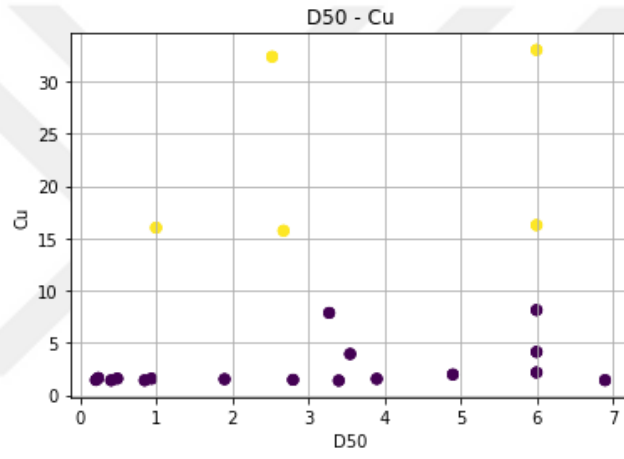
Şekil 7. 18 D10-D50 kümeleme analiz sonucu



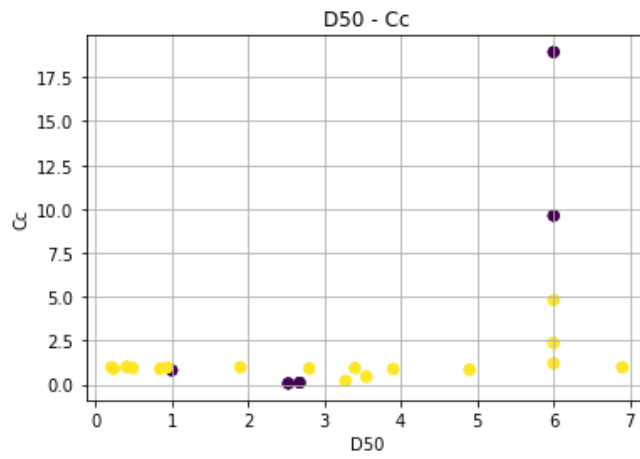
Şekil 7. 19 D10-Cu kümeleme analiz sonucu



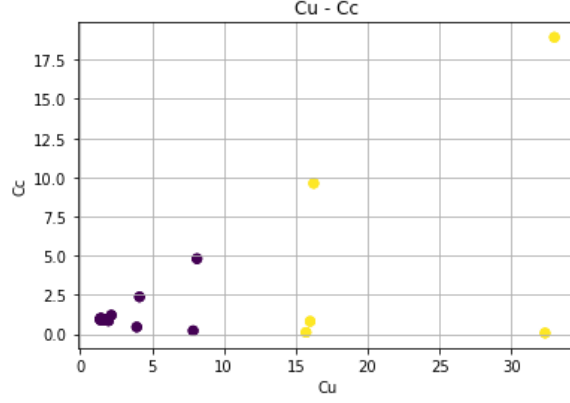
Şekil 7. 20 D10-Cc kümeleme analiz sonucu



Şekil 7. 21 D50-Cu kümeleme analiz sonucu



Şekil 7. 22 D50-Cc kümeleme analiz sonucu



Şekil 7. 23 Cu-Cc kümeleme analiz sonucu

Veriler arasındaki ilişkinin yönü ve derecesini belirlemek için korelasyon analizi de yapılmış olup sonuçlar Şekil 7. 24 de gösterilmiştir.

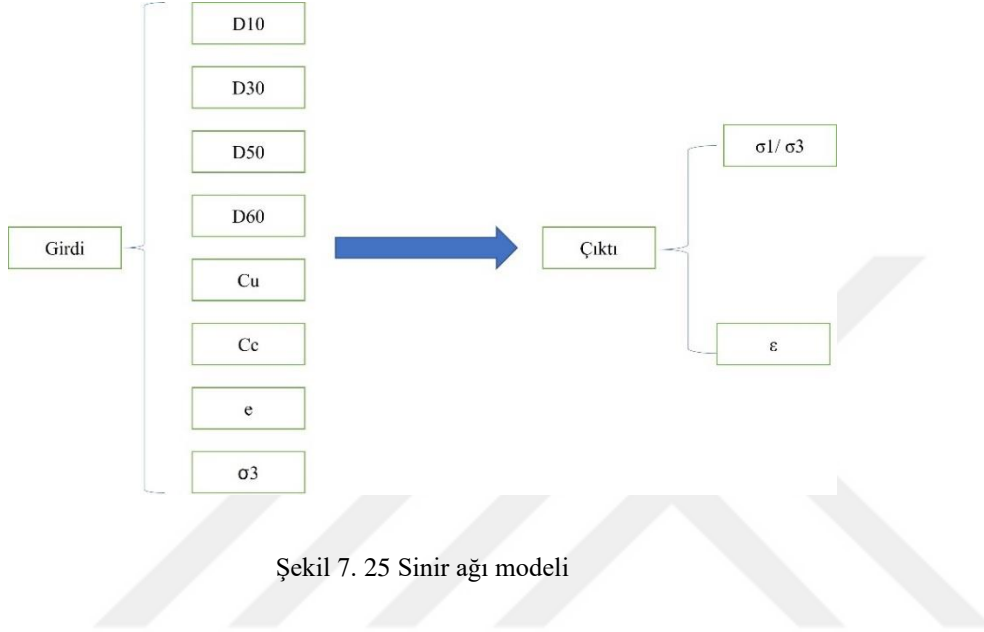
	D10	D50	Cu	Cc
D10	1.000000	0.581788	-0.416649	-0.210669
D50	0.581788	1.000000	0.220595	0.454031
Cu	-0.416649	0.220595	1.000000	0.593390
Cc	-0.210669	0.454031	0.593390	1.000000

Şekil 7. 24 Korelasyon İlişkisi

Korelasyon katsayısı $-1 \leq r \leq 1$ arasında değişmektedir. Korelasyon katsayısının 0'a yaklaşması veriler arasındaki ilişkinin zayıf olduğunu göstermekle beraber eğer değişkenler birlikte artıp azalırsa pozitif yönlü bir ilişki olmakta, değişkenin birinin artıp diğerinin azalması ise negatif yönlü bir ilişkiyi göstermektedir. Bu bilgiler kapsamında Şekil 7. 24'de verilen korelasyon değerleri incelendiği takdirde D10-D50 arasındaki ilişki 0.581788 ve Cu-Cc arasındaki ilişki ise 0.593390 ile aralarında orta dereceli ve pozitif yönlü bir ilişki olduğu gözlemlenmiş olup bu ikililer dışında kalan veriler de ise birbirleri arasındaki ilişki zayıftır.

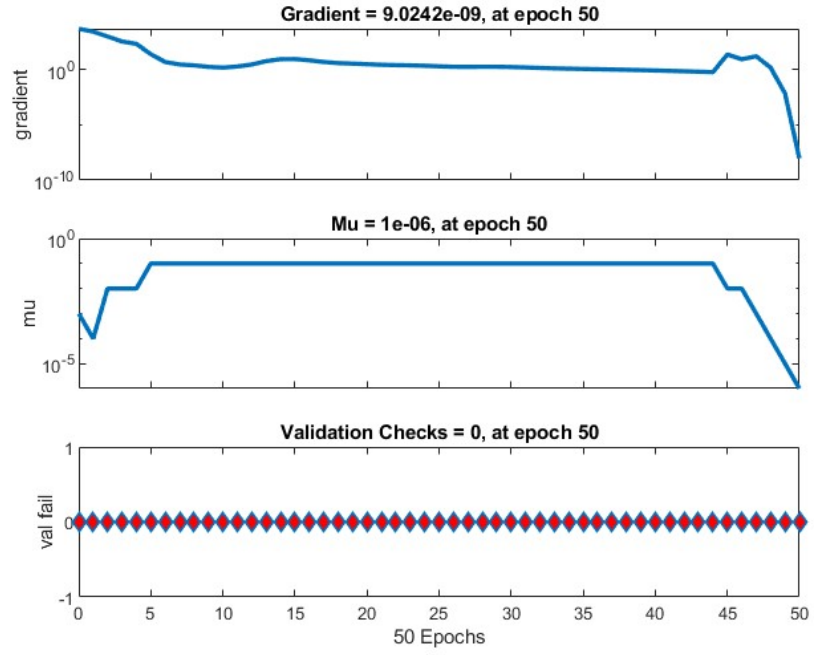
7.5. Yapay Sinir Ağları ile sonuçların modellenmesi

Matlab’da yapay sinir ağı modelini oluşturabilmek için nntool, nnstart vb. araçlar kullanılabilir. Bu çalışma kapsamında MATLAB R2022a sürümü kullanılmış olup yapay sinir ağı modeli nnstart aracı kullanılarak geliştirilmiştir. Sistemin girdi ve çıktıları Şekil 7. 25’de gösterilmiştir.

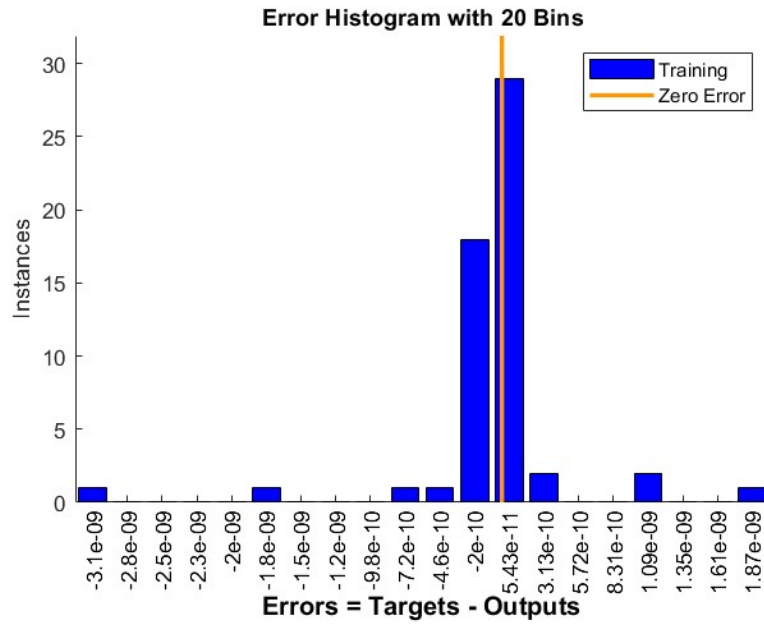


Şekil 7. 25 Sinir ağı modeli

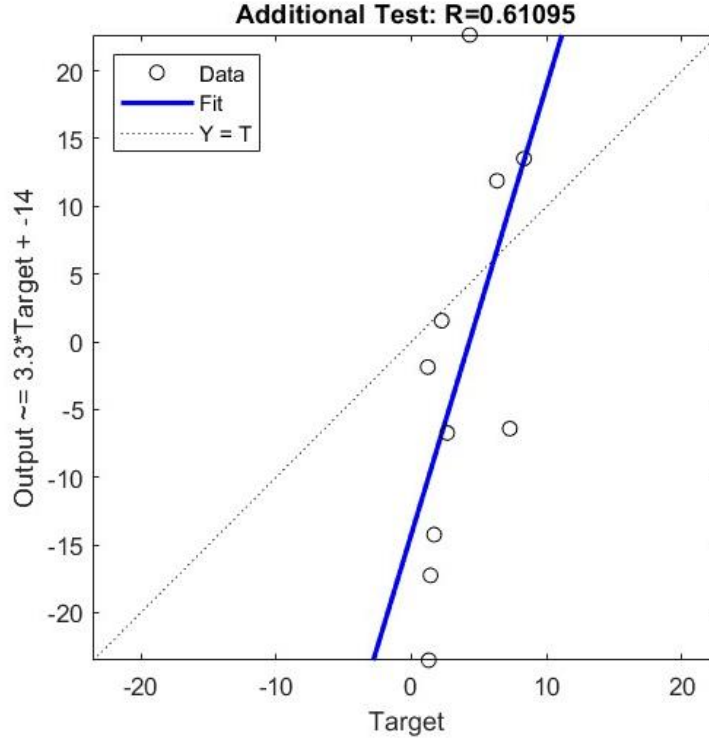
Analiz sonuçları incelendiğinde elde edilen grafikler Şekil 7. 26, Şekil 7. 27, Şekil 7. 28’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 26 Deneme durum grafikleri



Şekil 7. 27 Hata histogramı



Şekil 7. 28 Regresyon grafiği

Değişkenler arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla yapılan regresyon analizi sonuçlarına bakıldığında regresyon(R) değerinin 0.61095 olduğu görülmüştür. Bu değer veriler arasında bir ilişki olduğunu ifade etmektedir, ancak veri sayısının az olması ideale yakın bir değer bulunmasına engel olmaktadır.

8.GENEL SONUÇLAR

Kum-Çakıl zeminlerin sıvılaşma davranışını irdelemek amacıyla bir dizi kondolidasyonlu-drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. bu kapsamda %50 rölatif hazırlanan örnekler hem üniform hem de ağırlıkça %25,%50 ve %75 oranlarında ince çakıl ile karışım hazırlanarak 50 kPa, 100 kPa ve 200 kPa çevre basıncı altında deneye tabi tutulmuştur. Bu örneklerin deney sonuçları ise aşağıda sıralanmıştır.

1. Çevre basıncının artmasıyla zeminin dayanımı artmaktadır.
2. İyi derecelenmiş kum örneği kötü derecelenmiş ve üniform örneklere oranla dayanımı daha fazladır.
3. Kum-Çakıl karışımlı zeminlerde çakıl oranının %25 i geçtiği örneklerde dayanım da düşmektedir.
4. Gevşek kum zeminlerde sıvılaşma düşük çevre basınçlarında gerçekleşmesine karşın orta sıkı örneklerle yapılan bu çalışmada iri kum ve çakıllı zeminlerde 100kPa ve 200 kPa çevre basınçlarında, üniform ince kum örneğinde ise 50 kPa çevre basıncında sıvılaşma gözlemlenmiştir.
5. Sıvılaşma kriteri olarak seçilen boşluk suyu basıncı oranı r_u 'nun değeri 1.00 a eşit olduğunda sıvılaşmanın gerçekleştiği kabulü olsa da literatürde yapılan çalışmalar da göz önüne alındığında bu aralık bazı zeminler için 0.90-1.1 arasında değişebilmektedir. Bu çalışma da r_u değeri minimum 0.97 maksimum 1.05 değerine ulaşmıştır.
6. Membran penetrasyon etkisi ve tekrarlı membran kullanımı sebebiyle zemin dayanımlarında bir miktar düşüş gözlemlenmiştir.
7. Kümeleme sonuçlarında en iyi sonuç alınan metot k-means metodudur, bu analizlere göre D_{10} - D_{50} ve C_u - C_c arasında orta derecede pozitif yönlü bir ilişki mevcuttur.
8. Yapay sinir ağları modeli incelendiğinde regresyon katsayısı maksimum 0.61095 değerine ulaşarak kurulan modelin uygunluğu gözlemlenmiştir.

Bu konu ile bundan sonra yapılacak çalışmalar aşağıdaki yönlerde ilerleyebilir;

1. Farklı rölatif sıklık değerindeki özellikle gevşek ve sıkı zeminlerin sıvılaşma ilişkisi incelenebilir.
2. Kumların kayma dayanımını etkileyen faktörlerden olan dane şekli esas alınarak belirli bir rölatif sıklıktaki zeminlerde köşeli ve yuvarlak daneli zeminlerin sıvılaşma ilişkisi incelenebilir.

3. Gradasyon eğrisinde daha dar tanımlı bir bölgede ince çakıl içeriğini daha az aralıklarla arttırarak sınılaşma potansiyelinin değerdendirilmesi yapılabilir.
4. Membran penetrasyonunun dayanım üzerinde etkisi incelenebilir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abonyi, J., & Feil, B.**, 2007. *Cluster Analysis for Data Mining and System Identification*. Birkhauser Verlag AG.
- Aggarwal, C. C., & Reddy, C. K.**, 2014. *Data Clustering, Algorithms and Applications*. Taylor&Francis Group.
- Anderberg, M. R.**, 1973. *Cluster Analysis for Applications*. New York: Academic Press.
- ASTM, American Society for Testing and Materials**. Standars Test Methods for Maximum Index Density and Unit Weight of Soils Using a Vibratory Table. United States, Kabul: 1Şubat 2006, D4253-00.
- ASTM, American Society for Testing and Materials**. Standars Test Methods for Minimum Index Density and Unit Weight of Soils and Calculation of Relative Density. United States, Kabul: 1Şubat 2006, D4254-00.
- Bartlett, S. F., & Youd, T. L.**, 1995. Empirical Prediction of Liquefaction-Induced Lateral Spread. *Journal of Geotechnical Engineering*, s. 316-329.
- Bezdek, J. C.**, 1974. Cluster Validity with Fuzzy Sets. *Jornal of Cybernetics*, s. 58-73.
- Bilgin, T. T., & Çamurcu, Y.**, 2005. DBSCAN, OPTICS ve K-Means Kümeleme Algoritmalarının Uygulamalı Karşılaştırılması. *Politeknik Dergisi*, s. 139-145.
- Choobbasti, A. J., Ghalandarzadeh, A., & Esmaili, M.**, 2014. Experimental study of The Grading Characteristic Effect on The Liquefaction Resistance of Various Graded Sands And Gravelly Sands. *Arabian Journal of Geosciences*, s. 2739-2748.
- Cubrinovski, M., & Ishihara, K.**, 2002. Maximum And Minimum Void Ratio Characteristics of Sands. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, s. 65-78.
- Della, N., Arab, A., & Belkhatir, M.**, 2011. Effect of Confining Pressure and Depositional Method on the Undrained Shearing Response of Medium Dense Sand. *Journal of Iberian Geology*, s. 37-44.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Della, N., Arab, A., & Belkhatir, M.** ,2011. Static Liquefaction of Sandy Soil: An Experimental Investigation Into The Effects of Saturation And Initial State. *Acta Mechanica*, s. 175-186.
- Della, N., Muhammed, R. D., Canou, J., & Duplo, J. C.** ,2016. Influenza of Initial Conditions on Liquefaction Resistance of Sandy Soil From Chlef Region in Northern Algeria. *Geotechnical and Geological Engineering*, s. 1971-1983.
- Erdoğan, D.** ,2011. Çevrimsel Hareketlilik Davranışına Bağlı Yanal Zemin Deformasyonlarının Efektif Gerilme Tabanlı Sayısal Analizi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, s. 47-74.
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., & Stahl, D.** ,2011. *Cluster Analysis* (5 th Edition b.). John Wiley & Sons.
- Göktepe, A. B., Altun, S., & Sezer, A.** ,2005. Soil Clustering Fuzzy C-Means Algorithm. *Advanced in Engineering Software*, s. 691-698.
- Hazout, L., Zitouni, Z., Belkhatir, M., & Schanz, T.** ,2017. Evaluation of Static Liquefaction Characteristics of Saturated Loose Sand Through the Mean Grain Size and Extreme Grain Sizes. *Geotechnical and Geological Engineering*, s. 2079-2105.
- Hekim, M., & Orhan, U.**,2011. Bulanık C-Means Kümelene Yöntemine Çıkarımlı Yaklaşım. *İtüdergisi/d*, s. 11-17.
- Hennig, C., Meila, M., Murtagh, F., & Racci, R.** ,2016. *Handbook of Cluster Analysis*. Florida: Taylor&Francis Group.
- Holtz, R. D., Kovacs, W. D., & Sheahan, T. C.**, 2015. *Geoteknik Mühendisliğine Giriş* (2. b.). Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık.
- Işık, M., & Çamurcu, A. Y.** ,2007. K-Means, K-Medoids ve Bulanık C-Means Algoritmalarının Uygulamalı Olarak Performanslarının Tespiti. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, s. 31-35.
- Judd, A. G.** ,1980. The Use Cluster Analysis in The Derivation of Geotechnical Classifications. *Bulletin of the Association Engineering Geologists*, s. 193-211.
- Kaya Gülağız, F., & Şahin, S.**, 2017. Comparison of Hierarchical and Non-Hierarchical Clustering Algorithms. *International Journal of Computer Engineering and Information Technology*, s. 6-14.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Kogan, J., Nicholas, C., & Teboulle, M.**, 2006. *Grouping Multidimensional Data*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Kokusho, T., Hara, T., & Hiroaka, R.**, 2004. Undrained shear Strength of Granular Soils with Different Particle Gradations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, s. 621-629.
- Kramer, S. L.**, 2003. *Geoteknik Deprem Mühendisliği*. Ankara: Gazi Kitabevi Tic. Ltd. Şti.
- Krim, A., Zitouni, Z., Arab, A., & Belkhatir, M.**, 2013. Identification of The Behavior of Sandy Soil to Static Liquefaction and Microtomography. *Arabian Journal of Geosciences*, s. 2211-2224.
- Kuerbis, R., & Vaid, Y. P.**, 1988. Sand Sample Preparation-The Slurry Deposition Method. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, s. 107-118.
- Labuz, J. F., & Zang, A.**, 2012. Mohr-Coulomb Failure Criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, s. 975-979.
- Lade, P. V.**, 2016. *Triaxial Testing of Soils*. Chichester: WILEY Blackwell.
- Larose, D. T.**, 2005. *Discovering Knowledge In Data An Introduction to Data Mining*. Hoboken, New Jersey: John Wiley&Sons.
- Monkul, M. M., Etminan, E., & Şenol, A.**, 2016. Influence of Coefficient of Uniformity and Base Sand Gradation on Static Liquefaction of Loose Sands With Silt. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, s. 185-197.
- Monly, B. F., & Alberto, J. N.**, 2017. *Multivariate Statistical Methods* (4. Edition b.). Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Nacaroğlu, E., Toprak, S., DüNDAR, G., & Ceylan, M.**, 2019. K-Ortalamlar Kümeleme Analizi Yöntemiyle Deprem Kaynaklı Boru Hasarlarının İncelenmesi. Denizli: Ulusal Mühendislik Jeolojisi ve Jeoteknik Sempozyumu.
- Önalp, A., & Arel, E.**, 2011. Geoteknik mühendisliğinde yapay sinir ağı uygulamaları ve bir örnek: Zemin profilinin tahmin edilmesi. *İtü dergisi/d*, s. 3-14.
- Özaydın, K.**, 2007. Zeminlerde Sıvılaşma. İstanbul: Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

- Özaydın, K.** , 2008. *Zemin Mekaniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi.
- Öztemel, E.**, 2012. *Yapay Sinir Ağları*. İstanbul: Papatya Yayıncılık.
- Parry, R. G.** ,2004. *Mohr Circles, Stress Paths and Geotechnics* (2nd edition b.). New York: Spon Press.
- Patel, A., & Thakral, P.** ,2016. The Best Clustering Algorithms in Data Mining. *International Conference on Communication and Signal Processing*.
- Payan, M., Ayoubi, P., & Mirmo'azen, S. M.**, 2015. Effect of Different Parameters on Steady State and Monotonic Liquefaction of Gravelly Soils. San Antonio, Texas: ASCE.
- Poulos, S. J., Castro, G., & France, J. W.** ,1985. Liquefaction Evaluation Procedure. *Journal of Geotechnical Engineering* , s. 772-792.
- Taşkın, Ç., & Gökay Emel, G.**, 2010. Veri Madenciliğinde Kümeleme Yaklaşımları ve Kohonen Ağları ile Perakendecilik Sektöründe Bir Uygulama . *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, s. 395-409.
- Vaid, Y. P., Fisher, J. M., Kuerbis, R. H., & Negussey, D.**, 1990. Particle Gradation and Liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering*, s. 698-703.
- Valente de Oliveira, J., & Pedrycz, W.**, 2007. *Advances in Fuzzy Clustering and Its Applications*. West Sussex: John Wiley&Sons.
- Wierzchon, S., & Kłopotek, M.** ,2018. *Modern ALgorithms of Cluster Analysis*. Springer International Publishing.
- Wu, J., Kammerer, A. M., Riemer, M. F., Seed, R. B., & Pestana, J. M.** ,2004. Laboratory Study of Liquefaction Triggering Criteria. *13th World Conference on Earthquake Engineering*. Vancouver.
- Yegian, M. K., Ghahraman, V. G., & Harutiunyan, R. N.** ,1994. Liquefaction and Embankmenr Failure Case Histories, 1988 Armania Eartquake. *Journal of Geotechnical Engineering*, s. 581-596.
- Yoshimi, Y., Tanaka, K., & Tokimatsu, K.** , 1989. Liquefaction Resistance of a Partially Saturated Sand. *Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, s. 157-162.

KAYNAKLAR DİZİNİ (Devam)

Youd, T. L. ,1993. *Liquefaction-Induced Lateral Spread Displacement*. Hueneme, California: Naval Civil Engineering Laboratory Port Hueneme.

Youd, T. L. ,2003. Liquefaction Mechanisms and Induced Ground Failure. *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology* (s. 1159-1173). içinde Elsevier Science.





TEŞEKKÜR

Bu alıŐma sűresince her tűrlű bilgi birikimi ve deneyimiyle yol gűsteren deęerli hocam Prof. Dr. Alper Sezer'e, deneysel çalıŐmam boyunca kendisine baŐvurduęum anda her tűrlű desteęi veren deęerli hocam Dr. Őęr. Őyesi Devrim Erdoğan'a, Őn hazırlık sűrecinde deney dűzeneęini ve sistemin iŐleyiŐini en ince ayrıntısıyla Őęreten Dr. Mohammed Mahmoudi' ye, her daim yanımda olan maddi ve manevi desteęiyle bana gű veren eŐim Doç. Dr. aęlayan Hızal'a, kardeŐim Fatih Polat'a ve varlıkları en bűyűk desteęim olan kızlarım Zeynep Begűm ve Azra'ya sonsuz teŐekkűrlerimi sunuyorum.

29 / 05 / 2023

Gűl Ece HIZAL



ÖZGEÇMİŞ

Gül Ece Hızal, ilk ve orta öğrenimini Şehit Taş İlköğretim okulunda, lise öğrenimini Şehit Erkan Özcan Lisesinde tamamlamıştır. 2010 senesinde DEU İMYO İnşaat bölümünden mezun olmuştur. Aynı yıl içinde EGE ASFALT AŞ. şirketinde şantiye stajıyla başladığı iş yaşamına aynı şirkette 3 sene boyunca farklı projelerde teknik ofis departmanında devam etmiştir. 2012 senesinde EÜ İnşaat mühendisliğini kazanmıştır. 2015 senesinde Genser Yapı Mühendisliği Ofisinde Teknik ofis stajını yapmış, 2016 senesinde İnşaat mühendisliği bölümünden mezun olmuştur.

